



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
de Colombia

**EFFECTO DE LA ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE EN LAS PROPIEDADES  
MECÁNICAS Y DE RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL ION CLORURO  
EN EL MORTERO**

**PRESENTADO POR:**

**LEIDY MILENA MENESES SUÁREZ 505572**

**WILNER ALBERTO DÍAZ PARDO 504060**

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTA D.C.  
2019**



**UNIVERSIDAD CATÓLICA**  
**de Colombia**

**EFFECTO DE LA ADICIÓN DE CENIZA VOLANTE EN LAS PROPIEDADES  
MECÁNICAS Y DE RESISTENCIA A LA PENETRACIÓN DEL ION CLORURO  
EN EL MORTERO**

**PRESENTADO POR:**

**LEIDY MILENA MENESES SUÁREZ 505572**

**WILNER ALBERTO DÍAZ PARDO 504060**

**DIRECTOR:**

**CAMILO HIGUERA FLÓREZ**

**UNIVERSIDAD CATOLICA DE COLOMBIA  
FACULTAD DE INGENIERIA  
PROGRAMA DE INGENIERÍA CIVIL  
BOGOTA D.C.  
2019**



## Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)

La presente obra está bajo una licencia:

**Atribución-NoComercial-SinDerivadas 2.5 Colombia (CC BY-NC-ND 2.5)**

Para leer el texto completo de la licencia, visita:

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/2.5/co/>

**Usted es libre de:**



Compartir - copiar, distribuir, ejecutar y comunicar públicamente la obra

**Bajo las condiciones siguientes:**



**Atribución** — Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciante (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o que apoyan el uso que hace de su obra).



**No Comercial** — No puede utilizar esta obra para fines comerciales.



**Sin Obras Derivadas** — No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.

**NOTA DE ACEPTACIÓN:**

---

---

---

---

---

---

---

**FIRMA DEL PRESIDENTE DEL JURADO**

---

**FIRMA JURADO**

---

**FIRMA JURADO**

**BOGOTA D.C.**

## **DEDICATORIA**

El presente trabajo de grado refleja esfuerzo, valentía y amor; por esta razón está dedicado principalmente a Dios y a nuestras familias que estuvieron con nosotros siempre dándonos la inspiración, fuerza, confianza y voluntad para poder continuar este proceso y conseguir tan esperada meta, logrando que este sueño se haga realidad.

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo es dedicado principalmente a Dios, por darnos la fuerza necesaria, ser nuestro apoyo y brindarnos la fortaleza pertinente durante el proceso de ejecución de nuestra tesis.

Esta tesis investigativa ha requerido esfuerzo y dedicación, no hubiera sido posible su finalización sin la ayuda del ingeniero Camilo Higuera, quien con paciencia y entusiasmo nos estuvo guiando y orientando paso a paso para la realización de este proyecto.

También, agradezco al equipo de laboratorio que nos colaboró para realizar los correspondientes ensayos de laboratorios con el fin de cumplir con nuestros objetivos.

De igual forma, agradecemos a nuestras familias Meneses Suárez y Díaz Pardo, y todas las personas que fueron partícipes de la elaboración de este trabajo, quienes gracias a su apoyo y constancia logramos culminar con éxito esta tesis y no permitieron que desfalleciéramos en este proceso de investigación.

Agradezco a la Universidad Católica de Colombia por permitirnos formarnos como profesionales y a cada docente que hizo parte de nuestro proceso de aprendizaje.

## CONTENIDO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>RESUMEN.....</b>  | <b>25</b> |
| <b>INTRODUCCIÓN.....</b>                                       | <b>26</b> |
| <b>1 GENERALIDADES .....</b>                                   | <b>28</b> |
| 1.1 ANTECEDENTES.....  | 28        |
| 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....                           | 32        |
| 1.2.1 Descripción del problema .....                           | 32        |
| 1.2.1 Formulación del problema .....                           | 34        |
| 1.2.2 Sistematización .....                                    | 34        |
| 1.3 OBJETIVOS.....   | 35        |
| 1.3.1 Objetivo general. ....                                   | 35        |
| 1.3.2 Objetivos específicos.....                               | 35        |
| 1.4 JUSTIFICACIÓN .....  | 36        |
| 1.5 DELIMITACIÓN.....  | 37        |
| 1.5.1 Espacio .....  | 37        |
| 1.5.2 Tiempo .....   | 38        |
| 1.5.3 Contenido.....   | 38        |
| 1.5.4 Alcance .....  | 38        |
| 1.6 MARCO REFERENCIAL.....                                     | 39        |
| 1.6.1 Corrosión por cloruros .....                             | 39        |
| 1.6.2 Factores que inciden en la corrosión .....               | 40        |
| 1.6.3 Modelos tradicionales.....                               | 41        |
| 1.6.4 Coeficiente de difusión .....                            | 44        |
| 1.6.5 Ensayos de difusión .....                                | 44        |
| 1.6.6 Ensayos de migración para estados no estacionarios ..... | 45        |
| 1.6.7 Nordtest NT-492 (NordTest 1999). ....                    | 47        |
| 1.6.8 Iones cloruro y otros agentes agresivos .....            | 50        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| 1.6.9    | Ceniza volante.....   | 51        |
| 1.6.10   | Mortero.....  | 54        |
| 1.7      | MARCO LEGAL .....   | 62        |
| 1.8      | METODOLOGÍA .....   | 64        |
| 1.9      | TIPO DE ESTUDIO.....  | 65        |
| <b>2</b> | <b>CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS .....</b>                               | <b>66</b> |
| 2.1      | AGREGADO ARENA SILÍCEA .....  | 66        |
| 2.1.1    | Humedad Natural .....   | 66        |
| 2.1.2    | Absorción .....   | 68        |
| 2.1.3    | Densidad y Peso Específico .....  | 70        |
| 2.1.4    | Masa unitaria suelta .....  | 72        |
| 2.1.5    | Masa unitaria compactada.....   | 74        |
| 2.1.6    | Granulometrías del agregado .....   | 76        |
| 2.2      | FOTOGRAFÍAS DEL AGREGADO.....   | 81        |
| 2.2.1    | Fotografías microscópicas del agregado .....                                  | 82        |
| 2.3      | PRUEBA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X .....                                      | 83        |
| 2.4      | CEMENTO .....   | 84        |
| 2.4.1    | Parámetros físicos y químicos del cemento.....                                | 84        |
| 2.4.2    | Prueba de fluorescencia de rayos X .....                                      | 85        |
| 2.5      | CENIZA VOLANTE .....  | 86        |
| 2.6      | ELABORACIÓN DE MUESTRAS DE MORTERO .....                                      | 88        |
| <b>3</b> | <b>CARACTERIZACION DE MUESTRAS DE MORTERO .....</b>                           | <b>92</b> |
| 3.1      | RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD EN CUBOS DE MORTERO ..... | 92        |
| 3.2      | DENSIDAD Y POROSIDAD.....   | 107       |
| 3.2.1    | Porosidad y vacíos .....  | 109       |
| 3.2.2    | Densidad Aparente.....  | 111       |
| 3.2.3    | Densidad Volumétrica .....  | 113       |



|          |   |            |
|----------|---|------------|
| 3.3      | NT BUILD-492 .....                          | 115        |
| 3.4      | SORTIVIDAD .....                            | 124        |
| <b>4</b> | <b>ANÁLISIS DE RESULTADOS .....</b>         | <b>134</b> |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....</b> | <b>145</b> |
| 5.1      | CONCLUSIONES .....                          | 145        |
| 5.2      | RECOMENDACIONEs.....                        | 146        |
| <b>6</b> | <b>BIBLIOGRAFÍA .....</b>                   | <b>148</b> |
|          | <b>ANEXO 1 .....</b>                        | <b>152</b> |
|          | <b>ANEXO 2 .....</b>                        | <b>159</b> |

## LISTA DE FIGURAS

|  |     |
|--|-----|
| Figura 1 Sistematización.....  | 34  |
| Figura 2 Estados de difusión estacionario y no estacionario .....              | 42  |
| Figura 3 Definición del coeficiente de difusión.....                           | 44  |
| Figura 4 Esquema de ensayo RCPT .....  | 46  |
| Figura 5 Montaje esquemático del ensayo NT Build 492.....                      | 48  |
| Figura 6 Ensayo para estado no estacionario.....                               | 49  |
| Figura 7 Composición del mortero .....   | 56  |
| Figura 8. Procedimiento de la granulometría .....                              | 77  |
| Figura 9 Agregado utilizados .....   | 82  |
| Figura 10 Agregado #30 Aumento 34x .....                                       | 82  |
| Figura 11 Agregado #12 Aumentado 34x .....                                     | 83  |
| Figura 12 Elaboración de Cubos de Mortero .....                                | 89  |
| Figura 13 Mezcla de Mortero .....  | 89  |
| Figura 14 Elaboración de Cilindros de Mortero.....                             | 89  |
| Figura 15 Ensayo de Fluidez Mezcla de Mortero.....                             | 90  |
| Figura 16 Curado cubos de Mortero .....  | 92  |
| Figura 17 Cubos de mortero .....   | 93  |
| Figura 18 Cubo en Maquina Universal - Ensayo resistencia a la compresión. .... | 93  |
| Figura 19. Peso Muestras saturadas .....                                       | 107 |
| Figura 20. Peso muestra sumergida .....  | 108 |

|  |     |
|--|-----|
| Figura 21 Peso muestra seca .....                  | 108 |
| Figura 22 Ensayo NT Build 492 .....                | 117 |
| Figura 23 Ensayo NT Build 492 .....                | 117 |
| Figura 24 Muestra seca ensayo Sortividad.....      | 124 |
| Figura 25. Montaje para ensayo de sortividad ..... | 125 |
| Figura 26 Toma de datos Sortividad.....            | 126 |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1 Rangos de penetrabilidad ensayo RCPT (ASTM 1991).....                   | 46 |
| Tabla 2 Tiempo de fraguado.....   | 61 |
| Tabla 3 Módulo de finura .....  | 61 |
| Tabla 4 Resistencia a la compresión .....                                       | 62 |
| Tabla 5 Datos Obtenidos Ensayo de Humedad.....                                  | 66 |
| Tabla 6 Resultados Ensayo Humedad Natural .....                                 | 67 |
| Tabla 7 Datos Obtenidos Ensayo de Absorción .....                               | 68 |
| Tabla 8 Resultados Ensayo de Absorción .....                                    | 69 |
| Tabla 9 Datos Obtenidos Ensayo Densidad .....                                   | 70 |
| Tabla 10 Resultados Ensayos de Densidad y Peso Específico del agregado. ....    | 72 |
| Tabla 11 Datos Obtenidos Ensayo Masa Unitaria .....                             | 73 |
| Tabla 12 Masa unitaria suelta (gr/cm <sup>3</sup> ) del agregado.....           | 74 |
| Tabla 13 Datos Obtenidos Ensayo Masa Unitaria Compactada .....                  | 75 |
| Tabla 14 Masa unitaria compactada (gr/cm <sup>3</sup> ) del agregado.....       | 76 |
| Tabla 15 Granulometría del agregado #12. ....                                   | 78 |
| Tabla 16 Granulometría del agregado #30. ....                                   | 80 |
| Tabla 17 Composición química de la arena para la fabricación de las muestras. . | 84 |
| Tabla 18 Parámetros físicos del cemento utilizado en los ensayos. ....          | 85 |
| Tabla 19 Parámetros químicos del cemento utilizado en los ensayos.....          | 85 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 20 Composición química del cemento para la fabricación de las probetas..          | 86  |
| Tabla 21 Caracterización de Ceniza Volante .....  | 87  |
| Tabla 22 Volumetría Muestras de Mortero.....  | 90  |
| Tabla 23 Porcentajes de Variación Ceniza Volante .....                                  | 91  |
| Tabla 24 Resultados de Compresión para 0% de ceniza volante.....                        | 94  |
| Tabla 25 Resultados de Compresión para 10% de ceniza volante.....                       | 95  |
| Tabla 26 Resultados de Compresión para 20% de ceniza volante.....                       | 96  |
| Tabla 27 Resultados de Compresión para 30% de ceniza volante.....                       | 97  |
| Tabla 28 Modulo de elasticidad y Esfuerzo del concreto para la muestra del 0%           | 100 |
| Tabla 29 Modulo de elasticidad y Esfuerzo del concreto para la muestra del 10%<br>..... | 102 |
| Tabla 30 Modulo de elasticidad y Esfuerzo del concreto para la muestra del 20%<br>..... | 103 |
| Tabla 31 Modulo de elasticidad y Esfuerzo del concreto para la muestra del 30%<br>..... | 104 |
| Tabla 32 Resistencia a la Compresión y Módulo de Elasticidad.....                       | 105 |
| Tabla 33 Datos Ensayo Densidad y Porosidad.....   | 109 |
| Tabla 34 Porosidad - Vacíos.....  | 110 |
| Tabla 35 Promedio porosidad y Vacíos .....  | 110 |
| Tabla 36 Densidad Aparente .....  | 112 |
| Tabla 37 Promedio Densidad Aparente .....   | 112 |
| Tabla 38 Densidad Volumétrica .....   | 114 |
| Tabla 39 Promedio Densidad Volumétrica.....   | 114 |

|   |     |
|---|-----|
| Tabla 40 Muestra 1 - 0% FA .....                  | 118 |
| Tabla 41 Muestra 2 - 0% FA .....                  | 118 |
| Tabla 42 Muestra 3 - 0% FA .....                  | 118 |
| Tabla 43 Muestra 1 - 10% FA .....                 | 119 |
| Tabla 44 Muestra 2 - 10% FA .....                 | 119 |
| Tabla 45 Muestra 3 - 10% FA .....                 | 119 |
| Tabla 46 Muestra 2 - 20% FA .....                 | 120 |
| Tabla 47 Muestra 1 - 20% FA .....                 | 120 |
| Tabla 48 Muestra 3 - 20% FA .....                 | 120 |
| Tabla 49 Muestra 2 - 30% FA .....                 | 121 |
| Tabla 50 Muestra 1 - 30% FA .....                 | 121 |
| Tabla 51 Muestra 3 - 30% FA .....                 | 121 |
| Tabla 52 Resultados Coeficiente de Difusión ..... | 122 |
| Tabla 53 Promedio Coeficiente de Difusión .....   | 123 |
| Tabla 54 Sortividad muestra 0% .....              | 127 |
| Tabla 55 Sortividad muestra 10% .....             | 128 |
| Tabla 56 Sortividdad 20% .....                    | 128 |
| Tabla 57 Sortividad 30% .....                     | 129 |
| Tabla 58 Sortividad Para todas las muestras ..... | 129 |

## LISTA DE GRÁFICAS

|   |     |
|---|-----|
| Gráfica 1 Curva de gradación del agregado # 12 .....  | 79  |
| Gráfica 2 Curva de gradación del agregado #30 .....   | 81  |
| Gráfica 3 Resistencia a la Compresión a los 7 ,14 y 28 días con 0% de ceniza volante .....    | 94  |
| Gráfica 4 Resistencia a la Compresión a los 7,14 y 28 días con 10% de ceniza volante .....    | 95  |
| Gráfica 5 Resistencia a la Compresión a los 7,14 y 28 días con 20% de ceniza volante .....    | 96  |
| Gráfica 6 Resistencia a la Compresión a los 7, 14 y 28 días con el 30% de ceniza Volante..... | 98  |
| Gráfica 7 Esfuerzo – Deformación 0%.....  | 101 |
| Gráfica 8 Esfuerzo – Deformación 10%.....   | 102 |
| Gráfica 9 Esfuerzo – Deformación 20%.....   | 103 |
| Gráfica 10 Esfuerzo – Deformación 20%.....  | 104 |
| Gráfica 11 Módulo de Elasticidad .....  | 105 |
| Gráfica 12 Resistencia a la compresión.....   | 106 |
| Gráfica 13 Porosidad y Vacíos.....  | 111 |
| Gráfica 14 Densidad Aparente.....   | 113 |
| Gráfica 15 Densidad Volumétrica .....   | 115 |
| Gráfica 16 Perfil Coeficiente de Difusión .....   | 123 |
| Gráfica 17 Sortividad Muestra 0% .....  | 130 |

|   |     |
|---|-----|
| Gráfica 18 Sortividad Muestra 10% .....                                     | 131 |
| Gráfica 19 Sortividad Muestra 20% .....                                     | 132 |
| Gráfica 20 Sortividad Muestra 30% .....                                     | 133 |
| Gráfica 21 Resistencia a la compresión Vs Dosificación Ceniza Volante ..... | 135 |
| Gráfica 22 Densidad aparente vs Sortividad inicial.....                     | 136 |
| Gráfica 23 Densidad aparente Vs Sortividad secundaria.....                  | 137 |
| Gráfica 24 Densidad volumétrica vs Sortividad inicial.....                  | 138 |
| Gráfica 25 Densidad volumétrica vs Sortividad.....                          | 138 |
| Gráfica 26 Porosidad vs Sortividad inicial.....                             | 139 |
| Gráfica 27 Porosidad vs Sortividad secundaria .....                         | 139 |
| Gráfica 28 Sortividad vs Resistencia a la compresión .....                  | 140 |
| Gráfica 29 Sortividad vs Módulo de Elasticidad.....                         | 141 |
| Gráfica 30 Sortividad vs Dnssm.....   | 142 |
| Gráfica 31 Porosidad vs Dnssm.....  | 143 |
| Gráfica 32 Resistencia a compresión vs Porosidad.....                       | 144 |



## LISTA DE ANEXOS 1

|  |     |
|--|-----|
| Ilustración 1 Materiales para fabricación de muestras de mortero.....  | 152 |
| Ilustración 2 Fabricación de cilindro de mortero.....                  | 153 |
| Ilustración 3 Resistencia a la compresión y Modulo de elasticidad..... | 154 |
| Ilustración 4 Ensayo Porosidad y Vacíos. Muestra saturada .....        | 155 |
| Ilustración 5 Ensayo Porosidad y Vacíos. Muestra sumergida .....       | 155 |
| Ilustración 6 Ensayo Porosidad y Vacíos. Muestra seca .....            | 156 |
| Ilustración 7 Ensayo NT Build 492 .....                                | 156 |
| Ilustración 8 Penetración ion Cloruro .....                            | 157 |
| Ilustración 9 Ensayo Sortividad.....                                   | 157 |

## LISTA DE ANEXOS 2

|   |     |
|---|-----|
| Anexo 1 Resistencia a la compresión 0% Muestra 1. Parte a .....   | 159 |
| Anexo 2 Resistencia a la compresión 0% Muestra 1. Parte b .....   | 160 |
| Anexo 3 Resistencia a la compresión 0% Muestra 2. Parte a .....   | 161 |
| Anexo 4 Resistencia a la compresión 0% Muestra 2. Parte b .....   | 162 |
| Anexo 5 Resistencia a la compresión 0% Muestra 3. Parte a .....   | 163 |
| Anexo 6 Resistencia a la compresión 0% Muestra 3. Parte b .....   | 164 |
| Anexo 7 Resistencia a la compresión 10% Muestra 1. Parte a.....   | 165 |
| Anexo 8 Resistencia a la compresión 10% Muestra 1. Parte b.....   | 166 |
| Anexo 9 Resistencia a la compresión 10% Muestra 2. ....           | 167 |
| Anexo 10 Resistencia a la compresión 10% Muestra 3. ....          | 168 |
| Anexo 11 Resistencia a la compresión 20% Muestra 1. Parte a ..... | 169 |
| Anexo 12 Resistencia a la compresión 20% Muestra 1. Parte b ..... | 170 |
| Anexo 13 Resistencia a la compresión 20% Muestra 2. Parte a ..... | 171 |
| Anexo 14 Resistencia a la compresión 20% Muestra 2. Parte b ..... | 172 |
| Anexo 15 Resistencia a la compresión 20% Muestra 3. Parte a ..... | 173 |
| Anexo 16 Resistencia a la compresión 20% Muestra 3. Parte b ..... | 174 |
| Anexo 17 Resistencia a la compresión 30% Muestra 1. Parte a ..... | 175 |
| Anexo 18 Resistencia a la compresión 30% Muestra 1. Parte b ..... | 176 |
| Anexo 19 Resistencia a la compresión 30% Muestra 2. Parte a ..... | 177 |
| Anexo 20 Resistencia a la compresión 30% Muestra 2. Parte b ..... | 178 |

|  |     |
|--|-----|
| Anexo 21 Resistencia a la compresión 30% Muestra 3. .... | 179 |
| Anexo 22 Sortividad.....                                 | 180 |

## GLOSARIO

**Aglutinante:** Se clasifican de acuerdo con su forma de unión, aglomerantes o conglomerantes. Son materiales que cuentan con la capacidad de juntar fragmentos de diferentes materiales con el fin de conformar un material impactado.

**Carbonatación:** Es un proceso químico en el cual el dióxido de carbono ingresa en el concreto reaccionando así con los hidróxidos de calcio presentes con el fin de formar carbonatos.

**Cemento Portland:** Es un material empleado en la construcción como resultado de la pulverización del Clinker Portland con la adición de una o más formas de sulfato de calcio.

**Ceniza Volante:** Es un material que se obtiene por transformaciones fisicoquímicas o que se puede recolectar de los gases que salen de tubos de desfogue de plantas de energía que funcionan con carbón (termoeléctricas).

**Cloruros:** Compuestos químicos orgánico unido a un grupo alquilo que contienen iones cloruros, los cuales generan la corrosión en el acero de refuerzo.

**Coeficiente de difusión:** Es la facilidad con la que un soluto puede moverse en un disolvente, generado por la presión de la temperatura y la composición del sistema.

**Concreto Reforzado:** Concreto al cual se adicionan materiales resistentes a la tensión, tales como varillas de acero o alambre metálico.

**Concreto:** Mezcla de cemento portland, agua, aglomerantes y agregado fino o grueso, también puede contener aditivos químicos como las puzolanas o la escoria.

**Corrosión:** En términos generales es un fenómeno químico de oxidación que afecta a los metales o cualquier tipo de material con bajas cantidades de este.

**Deformación:** Es una alteración en la percepción de la forma de convencional de un objeto, como consecuencia de una fuerza exterior.

**Difusión:** Mezcla de sustancias generada por el movimiento natural de partículas que le impulsa su energía cinética.

**Durabilidad:** Es la capacidad que tiene el concreto ante la abrasión, procesos químicos u otras condiciones a los que puede ser sometido.

**Efecto puzolánico:** La puzolana es un material que puede variar de acuerdo con el porcentaje de hidróxido de calcio que posee, reaccionando a diferentes velocidades de cambio.

**Emisiones de CO<sub>2</sub>:** Es un gas que confirma gran parte de la capa atmosférica el cual tiene la capacidad de transformarse entre estados físicos y químicos de la materia.

- **Procesos Físicos:** Se presenta en los aglomerantes como el barro, la cola, y el betún
- **Procesos Químicos:** Se presenta en los conglomerantes como el yeso, la cal y el cemento.

**Ensayos:** Los ensayos al concreto son el primer paso del desarrollo constructivo que marca la pauta para un veredicto de calidad y durabilidad de las estructuras construidas con este material.

**Esfuerzo A Compresión:** Es la resistencia que desarrolla un elemento cuando se somete a una fuerza externa ejercida sobre su eje axial hacia el interior.

**Fraguado:** Es un proceso en el que a través de reacciones químicas el concreto fresco perdió su plasticidad y se endurece

**Granulometría:** Es el proceso mediante el cual se distribuyen los tamaños de un agregado por medio de tamices de malla con aberturas cuadradas.

**Ion Cloruro:** Al combinarse el gas cloruro con un metal se obtienen sales (ion cloruro) que se presenta en mayor cantidad en todas las fuentes de abastecimiento de agua y de drenaje.

**Material cementante suplementario:** Son cementos adicionados o compuestos a partir del cemento portland o Clinker mezclados con distintos aditivos.

**Migración:** Cantidad máxima permitida de una sustancia concreta e identificable capaz de pasar (transferirse) desde un material u objeto a otro.

**Mortero:** Es la mezcla de arena, agua, y aglomerante como yeso, cal o cemento.

**Pasivar:** Es una capa inerte formada sobre la superficie del material la cual se encarga de minimizar los ataques que son producidos por los agentes externos.

**Permeabilidad:** Propiedad que poseen los materiales que permiten el paso de fluidos y gases.

**Plasticidad:** Propiedad del concreto o mortero que define la trabajabilidad o facilidad de colocación y moldeo.

**Porosidad:** Capacidad que posee los materiales de absorber un fluido, o dejarlos pasar por medio de poros o espacios intermoleculares.

**Relación agua-cemento (a/c):** Relación de la masa de agua por la masa de cemento en el mortero.

**Resistencia:** Comportamiento de los materiales al ser sometidos a cargas exteriores, relacionándolas con los efectos interiores de las muestras y las deformaciones que se presentan en ellas.

**Sortividad:** Es una característica que poseen ciertos materiales granulares para absorber fluidos sin importar la composición de este.

**Trabajabilidad:** Es una propiedad que caracteriza al concreto o mortero, la cual determina su capacidad de mezcla, su facilidad de colocación moldeo y acabado.



## **RESUMEN**

En este proyecto investigativo se realizó un estudio sobre el comportamiento de la ceniza volante como aditivo al mortero, evaluando si sus características físicas y mecánicas aumentan o disminuyen.

El objetivo principal de este trabajo es evaluar el comportamiento del mortero al ser sometido al ion cloruro con base en el ensayo NT Build 492, y ver como este reacciona a diferentes porcentajes de adición de ceniza volante.

Se busca indagar sobre las mejoras que puede brindar la ceniza volante en el sector de la construcción, por lo cual, se ejecutaron ensayos con base en la norma técnica colombiana, en los cuales se adicionó diferentes porcentajes de ceniza volante, con fin de evaluar la resistencia del mortero, el módulo de elasticidad, la cantidad de poros y vacíos, NT- BUILD 492; a partir de los cuales se determina si la ceniza volante es un material ideal para ser implementado en la ejecución de obras civiles.

## INTRODUCCIÓN

El mortero es un material versátil debido a sus amplios usos en la ingeniería civil que brinda adherencia y base en la mampostería; por lo tanto, posee diferentes aplicaciones como la nivelación de pisos, disminución de la permeabilidad, acabados estructurales, recubrimientos y actualmente se implementa para realizar ensayos de control de calidad.

Por lo tanto, la influencia de las adiciones de minerales en las propiedades del concreto se puede evaluar en muestras de mortero; debido que con el concreto comparten características mecánicas similares, evaluando como afecta las propiedades mecánicas y de resistencia.

En este proyecto investigativo se analizó el comportamiento de la ceniza volante como material cementante suplementario en las muestras de mortero. Se realizó el diseño de mezcla variando el porcentaje de ceniza volante entre el 0% y el 30% para la fabricación de cilindros y de cubos de mortero. La ceniza volante implementada para esta investigación fue extraída de la central termoeléctrica TERMOPAIPA localizada en Paipa – Boyacá.

El objetivo principal, es determinar cómo se ven afectadas las propiedades mecánicas del mortero en presencia de la ceniza volante y como esta, puede mitigar la penetración del ion cloruro. Para esto, se realizan diferentes ensayos cumpliendo con las Normas Técnicas Colombianas NTC y la norma NT Build 492.

La ceniza volante de alta calidad es caracterizada por ser un material que mejora las propiedades mecánicas de resistencia y durabilidad del concreto o del mortero, garantizando que su implemento sea restable y amigable con el medio ambiente. De acuerdo con los cálculos realizados se evidenció que este mineral adicionados en porcentajes mayores al 10% genera un decrecimiento en las propiedades mecánicas del mortero.

# 1 GENERALIDADES

## 1.1 ANTECEDENTES

El concreto reforzado en la actualidad presenta problemas de corrosión en el acero de refuerzo que forma una capa de óxido de hierro, consiguiendo expandir su volumen de 3 a 4 veces con respecto al acero inicial; este aumento de volumen genera presiones internas, que logra acelerar su vida útil y deteriorar la durabilidad del concreto; como fisuras, grietas y delaminaciones, u otros daños que pueden llevar a la estructura inclusive hasta su colapso; debido a esto, se requieren soluciones económicas que pueden llegar a tener un costo elevado. Por lo tanto, es de gran importancia el estudio del fenómeno de la corrosión en las estructuras de concreto reforzado.

Se han desarrollado modelos e investigaciones en búsqueda de mitigar el impacto de este fenómeno, dado que la penetración del ion cloruro en el mortero es muy lenta, razón por la cual puede tardar años en completarse; debido a lo anterior se han elaborado ensayos aplicando un potencial eléctrico con el fin de reducir los tiempos de ensayo.<sup>1</sup> Por este motivo es importante conocer y evaluar el fenómeno de difusión y migración del ion cloruro dentro del mortero, implementando tensinas que proporcionen datos experimentales representativos de dicho fenómeno; de

---

<sup>1</sup> LIZARAZO-MARRIAGA, J. y CLAISSE, P., 2010. Determination of the transport properties of a blended concrete from its electrical properties measured during a migration test. Magazine of Concrete Research [en línea], vol. 62, no. 3, pp. 163-175. ISSN 0024-9831. DOI 10.1680/macr.2010.62.3.163. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.077952921601&doi=10.1680%2Fmacr.2010.62.3.163&partnerID=40&md5=69abb3936ac1805acd3935fb4d14caf5>.

acuerdo con esto se han analizado distintos métodos de ensayos para la determinación de la penetración del ion cloruro; como el ensayo RCPT (Rapid Chloride Permeability Test) o ASTM C1202, desarrollado por Whiting en el año 1981 que establece un índice para caracterizar la permeabilidad que posee el ion cloruro dentro del concreto, acelerando la permeabilidad del ion cloruro a través de la aplicación de un campo eléctrico<sup>2</sup>.

Se han presentado algunos inconvenientes e imprecisiones como lo son referentes al estado eventualmente no saturado que presentan las muestras, al alto voltaje fijado y a la concentración del ion cloruro. Se deben realizar estudios minuciosos en donde se establezcan limitaciones con el objetivo de lograr resultados concordantes en laboratorios diferentes.

El ensayo NT BUILD 492 (Ensayo Acelerado de Migración del Ion Cloruro) normalizado por el Nord Test, es uno de los más utilizados, este método es aplicable a concretos y morteros. El coeficiente de migración obtenido por medio de este ensayo es un índice de la resistencia del material a la penetración de ion cloruro, pero solo se puede realizar bajo condiciones no estacionarias<sup>3</sup>, por lo que el coeficiente de migración obtenido no puede compararse directamente con otros métodos de ensayo de carácter estacionario<sup>4</sup>.

---

<sup>2</sup> ASTM C1202, 2012. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. American Society for Testing and Materials., no. C, pp. 1-8. DOI 10.1520/C1202-12.2

<sup>3</sup> NT BUILD 492, 1999. Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Measurement, pp. 1-8. ISSN 0283-7153. DOI UDC 691.32/691.53/691.54

<sup>4</sup> TOMÁS, V.K., 2015. Permeabilidad a Cloruros en Hormigones Marítimos Evaluación CoMParativa de Métodos Nordtest NT BUILD 492 y ASTM C 1202 [en línea]. S.l.: Universidad de Chile. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/137715/Permeabilidad-acloruros-en-hormigones-maritimos-evaluacion-coMParativa-de-metodosNordtest.pdf?sequence=1>.

Además, se han investigado otras formas para mitigar la migración del ion cloruro y la reducción de emisiones de carbono a la atmósfera por causa de la elaboración de cemento portland, una de ellas son las adiciones minerales: ceniza volante, metacaolín, escoria de alto horno, humo de sílice y otros, empleados como materiales cementantes suplementarios.

En la actualidad se han elaborado distintos ensayos y estudios con la adición de estos minerales en los diseños de mezcla con resultados favorables y buena aceptación para su uso; se destaca el impacto favorable en el incremento de su resistencia y durabilidad, así como en el beneficio medioambiental<sup>5</sup>.

La reducción en la emisión de CO<sub>2</sub> y el consumo de energía debido a la fabricación de cemento portland, la incorporación de ceniza volante en altos volúmenes, humo de sílice y escoria de alto horno; por esta razón, se ha reflejado que el índice de consumo de energía y las emisiones de carbono se redujeron en un 47% y 41%<sup>6</sup>.

La ceniza volante es un subproducto de la combustión del carbón pulverizado en centrales térmicas generadoras de electricidad, que son arrastrados por los gases del proceso y recuperado en los filtros. En los Estados Unidos es el material cementante suplementario más utilizado<sup>7</sup>.

---

<sup>5</sup> RAMÓN CORRAL, H., SUSANA ARREDONDO, R., JORGE ALMARAL, S. y JOSÉ GÓMEZ, S., 2013. Corrosión por cloruros del acero de refuerzo embebido en concreto con agregado grueso reciclado y materiales cementantes suplementarios. Revista Ingeniería de Construcción RIC [en línea], vol. 28, no. 1, pp. 21-35. ISSN 07162952. DOI 10.4067/S0718-50732013000100002. Disponible en: <http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/view/482/pdf>

<sup>6</sup> ASSI LATEEF, CARTER KEALY, DEEVER EDWARD (EDDIE), ANAY RAFAL, Z.P., 2018. Sustainable concrete: Building a greener future. Journal of Cleaner Production [en línea], vol. 198, pp. 1641-1651. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.07.123. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.123>.

<sup>7</sup> STEVEN H. KOSMATKA, BEATRIX KERKHOFF, WILLIAM C. PANARESE, J.T., 2004. Diseño y Control de Mezclas de Concreto [en línea]. 1. Skokie, Illinois 60077-1083 EE.UU.: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. ISBN 0-89312233-5. Disponible en: [www.cement.org](http://www.cement.org).

Una de las aplicaciones más significativas de la ceniza volante es la incorporación al cemento para la elaboración de mezclas de morteros y concretos. Las tasas de sustitución normalmente se ejecutan entre 20% a 30%, debido a su forma esférica tiene mayor facilidad de trabajo en las mezclas.

La disminución de la segregación, disminución del calor de hidratación en estructuras de concreto, aumento de la durabilidad y permeabilidad, aumento de la resistencia a compresión a largo plazo y ahorro del cemento en las mezclas de concreto<sup>8</sup> ; son algunas de las ventajas que posee este mineral y cómo actúan en las propiedades mecánicas de los concretos y morteros.

Recientemente se han realizado varias investigaciones para el uso de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento; que caracteriza sus propiedades mecánicas con resultados de mejor calidad, mayor resistencia, durabilidad y trabajabilidad<sup>9</sup>, asimismo existen trabajos que estudian la capacidad de migración del ion cloruro al concreto con el uso de adición mineral; uno de estos es el empleo de ceniza volante para determinar los efectos de fijación de cloruros en concretos que influye en las propiedades de durabilidad de las estructuras ante la acción de los iones cloruro<sup>10</sup>; otra manera de evaluar la penetración del ion cloruro es el uso de altos volúmenes de ceniza volante que modifican su porcentaje de reemplazo en el concreto como lo proponen Elaboración propia de la tesis “Evaluación del uso de altos volúmenes de cenizas volantes en el hormigón”.<sup>11</sup>

---

<sup>8</sup> VALENCIA, S. y ELENA, L., 2001. Caracterización física química y mineralógica de las cenizas volantes. Ciencia e Ingeniería Neogranadina [en línea], vol. 10, pp. 47-62. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101007>.

<sup>9</sup> CÁCERES HUAQUISTO, S. y BELIZARIO QUISPE, G., 2018. Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. Revista de Investigaciones Altoandinas [en línea], vol. 20, no. 2, pp. 225-234. Disponible en: <http://huajsapata.unap.edu.pe/ria/index.php/ria/article/view/366/334>

<sup>10</sup> FONSECA BARRERA, L., 2016. Empleo de ceniza volante colombiana como material cementicio suplementario y sus efectos sobre la fijación de cloruros en concretos [en línea]. S.I.: Universidad Nacional de Colombia. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/53975/>.

<sup>11</sup> RIVERA JOFRÉ FELIPE ANDRÉS, LÓPEZ CASANOVA MAURICIO ALEJANDRO, CASTRO SEPÚLVEDA JAVIER EDUARDO, M.R.P.H., 2013. Evaluación del uso de altos volúmenes de cenizas volantes en el hormigón. ResearchGate [en línea], no. October, pp. 17. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/312898623\\_Evaluacion\\_del\\_uso\\_de\\_altos\\_volumenes\\_de\\_cenizas\\_volantes\\_en\\_el\\_hormigon?enrichId=rgreqe835ee31049925edb2d56b7dad4669c7XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMxMjg5ODYyMztBUzo0NTQ1MzUyNjIwMTk1ODRAMTQ4NTM4MTA1OT](https://www.researchgate.net/publication/312898623_Evaluacion_del_uso_de_altos_volumenes_de_cenizas_volantes_en_el_hormigon?enrichId=rgreqe835ee31049925edb2d56b7dad4669c7XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMxMjg5ODYyMztBUzo0NTQ1MzUyNjIwMTk1ODRAMTQ4NTM4MTA1OT).

## 1.2 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.2.1 Descripción del problema

La corrosión del acero es una de las principales patologías que afectan a las estructuras de concreto reforzado debido a procesos de carbonatación ( $\text{CO}_2$ ) y por penetración de iones cloruros ( $\text{Cl}^-$ ) al mortero, generan un deterioro prematuro a las infraestructuras civiles tales como, edificaciones, vías, puentes, plataformas marinas y represas.<sup>12</sup> De los dos fenómenos en mención, la penetración de cloruros es la más agresiva, debido a que sucede en un tiempo más corto y produce un deterioro más significativo al concreto. Estos iones de cloruro ingresan a este material a través de sus poros; este fenómeno se manifiesta de formas diferentes, como la expansión de este material disminuyendo las propiedades mecánicas del mortero con las cuales fue diseñado, fisuración interna, desprendimiento de trozos de mortero afectando de gran manera su durabilidad.

Hoy en día también se afronta otro problema ambiental causado por la producción cemento portland (OPC) se registra una tasa del 7% a nivel mundial en el consumo de energía debido a su fabricación y la emisión de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, que representa un riesgo ambiental.<sup>13</sup> China es el mayor productor de cemento y el mayor emisor de emisiones de  $\text{CO}_2$  en el mundo. La industria del cemento

---

<sup>12</sup> GUILLERMO, R.-R., WILLIAM, A.-C. y EMILIO, D.-T., 2015. Diseño de sistema de monitoreo remoto para evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro. Ingeniería, Investigación y Tecnología [en línea], vol. 16, no. 4, pp. 565-572. ISSN 14057743. DOI 10.1016/j.riit.2015.09.008. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1405774315000414>

<sup>13</sup> ASSI LATEEF, CARTER KEALY, DEEVER EDWARD (EDDIE), ANAY RAFAL, Z.P., 2018. Sustainable concrete: Building a greener future. Journal of Cleaner Production [en línea], vol. 198, pp. 1641-1651. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.07.123. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.123>.



representa aproximadamente el 10% de las emisiones antropogénicas actuales de dióxido de carbono y el 12-15% de la energía industrial total.<sup>14</sup>

Anualmente, alrededor de 10 billones de toneladas de concreto principalmente de cemento portland son producidos a nivel mundial, además la producción de cemento portland se espera que aumente 4 veces más en los próximos 30 años, debido a que representa un riesgo ambiental significativo<sup>15</sup>. Esta cantidad extraordinaria de energía para la fabricación de cemento portland y las emisiones de CO<sub>2</sub> ha elevado la conciencia mundial y ha llevado a investigadores a desarrollar opciones sostenibles en el mortero y en la fabricación del cemento portland; mientras numerosos estudios han examinado la adición de minerales o materiales cementantes suplementarios cómo una solución más sostenible y amigable con el medio ambiente.

Con base a lo anterior, es de gran transcendencia también evaluar el fenómeno de migración del ion cloruro dentro del mortero aplicando métodos experimentales. Hoy en día existen métodos y normas que establecen diversos tipos de ensayo tanto en condiciones de estado estacionario cómo no estacionario, que permiten establecer el coeficiente de difusión del ion cloruro.<sup>16</sup> Los ensayos más destacados y empleados en la actualidad son el RCPT normalizado por la ASTM, el ensayo acelerado de migración de cloruros (ACTM) y por último el ensayo del coeficiente de migración del ion cloruro (NT BUILD – 492).

---

<sup>14</sup> WANG, J.J., WANG, Y.F., SUN, Y.W., TINGLEY, D.D. y ZHANG, Y.R., 2017. Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], vol. 80, no. May, pp. 1162-1174. ISSN 18790690. DOI 10.1016/j.rser.2017.05.232. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.232>.

<sup>15</sup> idíb

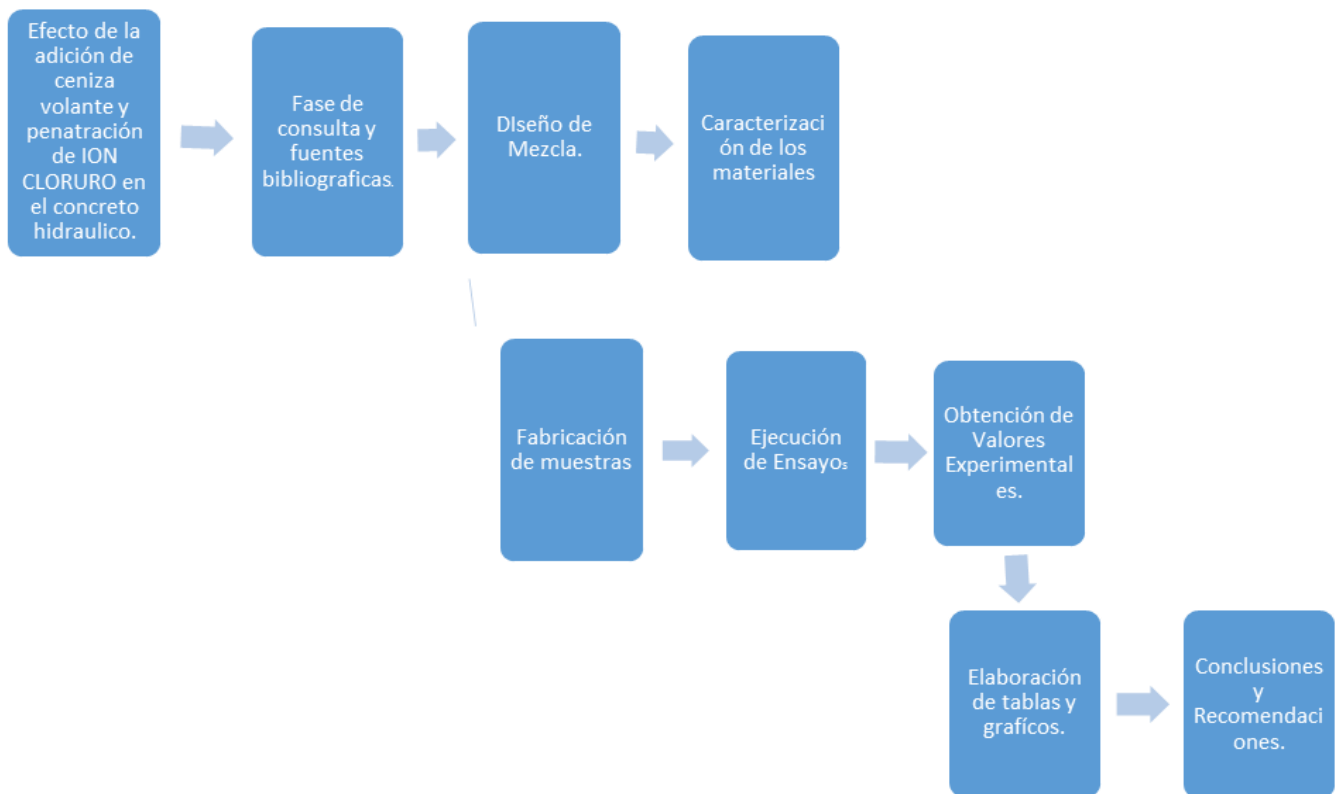
<sup>16</sup> MARRIAGA, J.L. y CLAISSE, P., 2011. Influencia de la adición de escoria de alto horno en la penetración de los cloruros en el concreto. *Ingeniería e Investigación* [en línea], vol. 31, no. 2, pp. 38-47. ISSN 01205609. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64322334005>.

### 1.2.1 Formulación del problema

Por medio de la ejecución de este trabajo investigativo se busca indagar sobre:  
**¿Cómo influye la adición de la ceniza volante en las propiedades mecánicas y la resistencia a la penetración del ion cloruro en el mortero?**

### 1.2.2 Sistematización

Figura 1 Sistematización



Fuente: Elaboración propia

## **1.3 OBJETIVOS**

### **1.3.1 Objetivo general.**

Determinar los efectos de la adición de ceniza volante en las propiedades mecánicas y la resistencia a la penetración del ion cloruro en el mortero.

### **1.3.2 Objetivos específicos.**

- ✓ Diseñar y elaborar diferentes mezclas de mortero con una adición mineral (ceniza volante), variando su porcentaje de reemplazo.
- ✓ Caracterizar las propiedades mecánicas de las probetas de mortero elaboradas con la adición de ceniza volante.
- ✓ Analizar la resistencia de penetración del ion cloruro en diferentes probetas de mortero elaboradas con la adición de ceniza volante, mediante la ejecución del ensayo de migración del ion cloruro (NT BUILD- 492)
- ✓ Evaluar e interpretar los resultados obtenidos de los ensayos de caracterización mecánica y del ensayo de migración del ion cloruro (NT-BUILD-492) en todas las probetas.

## 1.4 JUSTIFICACIÓN

El concreto es uno de los materiales más utilizados en la construcción debido a sus propiedades mecánicas; sin embargo, este material presenta algunos problemas como la corrosión del acero de refuerzo que generan deterioro prematuro en las estructuras a causa de la penetración del ion cloruro proveniente de la exposición a ambientes agresivos como zonas costeras e industriales. Por lo cual deben estar en continuo mantenimiento, ya que estas reparaciones por este fenómeno corresponden al 25% del total del costo destinado, el cual asciende a 125 billones de dólares anuales.<sup>17</sup>

Es importante conocer el problema que representa la corrosión en el deterioro de las estructuras, por esta razón, se han realizados estudios para observar cómo penetra el ion cloruro en el concreto, determinando las causas, consecuencias y soluciones posibles para combatir este fenómeno. Aunque existe un volumen considerable de investigaciones sobre este tema, no se comprende con claridad el ingreso del ion cloruro al mortero, que llegan a generar respuestas que requieren verificación e hipótesis sobre este fenómeno que se deben reevaluar. Por ende, es de gran importancia el estudio del mortero ya que es uno de los principales componentes de la construcción, siendo el ensayo de migración del ion cloruro el que mayor relevancia tiene, debido a que por medio de este se comprende de mejor manera cómo se puede mejorar la durabilidad y su vida útil.

---

<sup>17</sup> NACE INTERNATIONAL INSTITUTE, 2013. Corrosion 2013 come experience the Power of Nace. [en línea]. [Consulta: 14 septiembre 2018]. Disponible en: <http://events.nace.org/conferences/c2013/president.asp>

La presente investigación surge como motivación de los avances tecnológicos y científicos que se han realizado para conocer el proceso de ingreso del ion cloruro en el concreto orientado a un modelo de vida útil. Con el estudio de este fenómeno se permitirá conocer cómo se genera corrosión en el concreto y cómo por medio de la adición de ceniza volante se puede crear un material que sea más amigable con el medio ambiente, reduciendo la contaminación que se genera por la producción de cemento portland. Pero este fenómeno ha generado varias inquietudes, por lo cual en este trabajo se busca dar continuidad y posibles soluciones que mejoran las propiedades mecánicas del concreto, aumentar su durabilidad y mitigar los efectos del ion cloruro desde un punto de vista académico y tecnológico

Este trabajo busca servir como referencia en futuras investigaciones sobre el fenómeno de penetración del ion cloruro en el mortero en el medio local, que incentiven a indagar en la línea de patologías del concreto conociendo su importancia y cómo estas influyen en la ingeniería estructural, debido a que la mayoría de las estructuras, como puentes o edificaciones, se elaboran utilizando este material como componente principal.

## **1.5 DELIMITACIÓN**

### **1.5.1 Espacio**

- ✓ Espacios limitados de laboratorios en la Universidad Católica de Colombia para realizar ensayos necesarios sobre la corrosión del mortero y la migración del ion cloruro en el mortero.

### **1.5.2 Tiempo**

- ✓ Disponibilidad de horarios en los laboratorios en la Universidad Católica de Colombia para realizar las prácticas de ensayos correspondientes.
- ✓ Se cuenta con tiempo reducido (6 meses) para llevar a cabo los ensayos pertinentes para la investigación.

### **1.5.3 Contenido**

- ✓ Solo se cuenta con un solo tipo de ceniza volante y de cemento disponible para este estudio.

### **1.5.4 Alcance**

El alcance del proyecto se desarrolla en la evaluación y análisis de la penetración del ion cloruro en los morteros, en donde se observará como influye la ceniza volante en las propiedades mecánicas e hidráulicas del mortero; identificando si por medio de la aplicación de este material se logra mitigar dicho fenómeno y que mejoras puede aportar a las estructuras de mortero.

El tiempo estimado para el desarrollo investigativo del proyecto está dentro del periodo académico (enero – mayo 2019).

## **1.6 MARCO REFERENCIAL**

### **1.6.1 Corrosión por cloruros**

La corrosión se genera por diferentes mecanismos electroquímicos o galvánicos inducidos por la presencia del agua y del oxígeno; también puede estar influenciado por diferentes factores como las características propias del material, el espesor del recubrimiento, la temperatura y la presencia de cloruros. El acero reforzado tiende a pasivarse debido a la alcalinidad procedente de la hidratación del cemento y los alcalinos de este mismo; sin embargo, la pasivación del acero puede perderse por diferentes motivos. Unos de los más comunes son por penetración de iones de cloruro.<sup>18</sup>

La capa pasivante del acero se destruye por presencia de iones cloruro de forma puntual generando una corrosión por picadura, la cual se extiende en profundidad llegando a seccionar las barras de acero y los alambres de pretensado que son más finos y con una estructura cristalina compleja. Debido a esto el contenido máximo de cloruros se limita al 0.4% en concreto.

La penetración de ion cloruro en el concreto es muy lenta por lo cual puede tardar años en completarse; debido a esto se han elaborado ensayos aplicando un potencial eléctrico con el fin de reducir los tiempos. El ensayo de migración de ion

---

<sup>18</sup> AMADOR, A., 2014. Corrosión del acero en el hormigon armado. MÁS QUE INGENIERÍA [en línea]. [Consulta: 22 agosto 2018]. Disponible en: <https://masqueingenieria.com/blog/corrosion-acero-hormigon-armado/>

cloruro (NT BUILD – 492) es el más utilizado para dar una caracterización del fenómeno, hoy en día es uno de los más utilizado en el campo industrial.<sup>19</sup>

### 1.6.2 Factores que inciden en la corrosión

Uno de los factores que influyen en la corrosión del acero es la permeabilidad del recubrimiento, esto se da por la difusión que disminuye el pH del concreto incentivando a que se desarrolle la corrosión. Para que se genere un proceso de corrosión en el acero de refuerzo, la capa pasivadora que se crea de forma natural sobre este debe ser destruida, que se genera debido al porcentaje de alcalinidad de que posee el concreto al momento de reaccionar con sustancias ácidas o cloruros.

Las estructuras que se encuentran expuestas a constantes ciclos de humedad y secado son aquellas que tienden a sufrir de corrosión; cuando la relación agua/cemento es mayor al 0.6 la capacidad de que las sustancias ingresen a la muestra disminuye, haciendo que la permeabilidad aumente ya la porosidad capilar se incrementa.<sup>20</sup>

La fase de curado en el concreto es muy importante, debido a que, si esta no es eficiente, la permeabilidad disminuirá; por lo tanto, es importante que el curado se

---

<sup>19</sup> LIZARAZO-MARRIAGA, J. y CLAISSE, P., 2010. Determination of the transport properties of a blended concrete from its electrical properties measured during a migration test. Magazine of Concrete Research [en línea], vol. 62, no. 3, pp. 163-175. ISSN 0024-9831. DOI 10.1680/mac.2010.62.3.163. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.077952921601&doi=10.1680%2Fmac.2010.62.3.163&partnerID=40&md5=69abb3936ac1805acd3935fb4d14caf5>

<sup>20</sup> VALLE, M.A. del, PÉREZ LÓPEZ TEZOZÓMOC y MADRID, M.M., 2001. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. Secretaría de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte [en línea], no. 182, pp. 75. ISSN 0188-7297. DOI 0188-7297. Disponible en: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt182.pdf>.



desarrolle una vez terminada la etapa de fraguado final sin que haya interrupciones durante 7 días como mínimo.<sup>21</sup>

### **1.6.3 Modelos tradicionales**

#### **Leyes de Fick**

Las Leyes de Fick tiene una buena aceptación en los ensayos realizados para la determinación de ion cloruro, debido a su facilidad de entendimiento para ser aplicados. Estas leyes describen el comportamiento del ion cloruro al momento de penetrar el concreto dándole solución mediante ecuaciones diferenciales parciales.

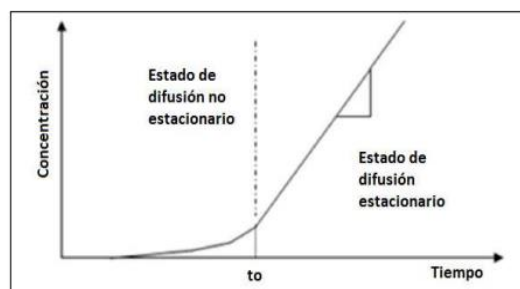
Las ecuaciones diferenciales implementadas en estas leyes, expresa el movimiento iónico; en la primera parte, se explica cuando el fenómeno no depende del tiempo y en la segunda parte cuando si depende del tiempo.

El proceso de difusión consiste en determinar la relación entre la concentración en función del tiempo. En la siguiente figura se observa que la concentración es directamente proporcional al tiempo, pero esta reacciona después de un tiempo  $\partial C/\partial t$ .

---

<sup>21</sup> Ibíd.

Figura 2 Estados de difusión estacionario y no estacionario



Fuente: González, J. (2014).

## Primera ley de Fick

Se considera estado estacionario, cuando la concentración y la velocidad no depende del tiempo. Por ende, la relación entre el flujo de iones ( $J_i$ ) y concentración ( $C_i$ ) es determinada por la primera ley de Fick; siendo una ecuación diferencial que indica que el flujo de iones depende únicamente del coeficiente de difusión ( $D_i$ ).

$$J_i = -D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde

$D_i$ : Coeficiente de Difusión  $\frac{m^2}{s}$

$J_i$  Flujo  $\frac{mol \cdot m^2}{s}$

$x$ : Distancia de penetración. ( $m$ )

## Segunda ley de Fick

En esta ley, se considera el tiempo en el fenómeno de difusión; debido a que en la primera Ley de Fick la concentración iónica ( $C_i$ ) disminuye con el tiempo haciendo que sea proporcional al flujo iónico en un determinado punto.

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} = - \frac{\partial J_i}{\partial x} \text{ (Ecuación 2)}$$

Esta ecuación diferencial relaciona la concentración de una especie iónica ( $C_i$ ) en el tiempo y en el espacio; teniendo como único parámetro el coeficiente de difusión ( $D_i$ ). En esta ley, el coeficiente de difusión es conocido como coeficiente aparente de difusión  $D_{app}$ .

$$C(x, t) - C_o = (C_s - C_o) \left( \operatorname{erfc} \left( \frac{x}{\sqrt{4tD_{app}}} \right) \right) \text{ (Ecuación 3)}$$

Donde:

$C(x,t)$ : Contenido promedio de cloruro a determinada profundidad.

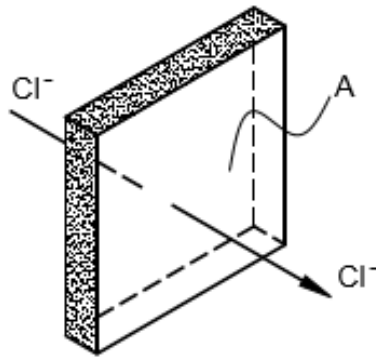
$C_o$ : Concentración inicial de cloruros dentro de la muestra (%)

$C_s$ : Concentración de cloruros dentro de la muestra (%)

#### 1.6.4 Coeficiente de difusión

A partir de la segunda ley de Fick, se determinaron modelos que relacionan la concentración iónica, siendo este, el porcentaje de transmisión de una solución iónica por medio de una sección de área por el gradiente de concentración.

*Figura 3 Definición del coeficiente de difusión.*



Fuente: González, J. (2014).

#### 1.6.5 Ensayos de difusión

De acuerdo con el tipo de flujo iónico se pueden implementar dos tipos de ensayos. El primero es el ensayo de difusión, el cual tiene como objetivo determinar la facilidad con que las especies iónicas ingresan a la muestra de concreto por medio de los poros. Las muestras se deben sumergir en una concentración de cloruros y luego de que se encuentren saturadas la difusión se presentará en el interior y el exterior de la muestra.

Luego de que pase el tiempo de exposición (2 a 3 meses) se mide el perfil de penetración del ion cloruro más la solución y la concentración a diferentes profundidades mediante el procedimiento descrito por la AASHTO 1994; calculando así el coeficiente de difusión.<sup>22</sup>

El segundo ensayo es el de migración, el cual depende del porcentaje de concentración de acuerdo con el tiempo; este ensayo se clasifica en dos tipos: estacionarios y no estacionarios. Para estos tipos de ensayos, la muestra debe estar saturada y ser sometida a una diferencial de potencial constante, para lo cual se implementan probetas de concreto o mortero con diámetro de 10 cm y espesor de 5 cm debidamente colocadas entre dos celdas que una contenga solución de cloruros y la otra sodio, potasio e hidróxidos. obteniendo así el flujo iónico a partir de la diferencia de potencial.

#### **1.6.6 Ensayos de migración para estados no estacionarios**

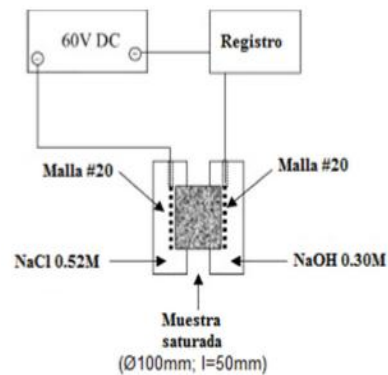
En este ensayo se calcula el coeficiente de difusión efectivo ( $D_{ef}$ ), calculado a partir de la segunda ley de Fick. este coeficiente entiende la dificultad que tiene las especies iónicas a traspasar la red de poros que posee el concreto. Este ensayo se fundamenta en la exposición de una muestra de concreto o mortero a la penetración del ion cloruro, teniendo como factor importante el tiempo ya que es muy importante para calcular el coeficiente de difusión.

---

<sup>22</sup> STANISH, K.D., HOOTON, R.D. y THOMAS, M.D., 1997. Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete : A Literature Review. Prediction of Chloride Penetration in Concrete, pp. 31.

El ensayo de migración para estados no estacionarios más empleado es el “rapid chloride penetrability test (RCPT)” cuyo procedimiento está descrito ASSHTO 277 (AASHTO 2007a) y ASTM C1202 (ASTM 1991). Este ensayo evalúa la cantidad de corriente que transita por el circuito, determinando la calidad que posee la muestra de permitir el paso de los iones cloruro.

Figura 4 Esquema de ensayo RCPT



Fuente: González, J. (2014).

Tabla 1 Rangos de penetrabilidad ensayo RCPT (ASTM 1991)

| Carga que pasa (Coulombs) | Penetrabilidad del ion cloruro |
|---------------------------|--------------------------------|
| >4000                     | Alta                           |
| 2000 – 4000               | Moderada                       |
| 1000 – 2000               | Baja                           |
| 100 – 1000                | Muy baja                       |
| < 100                     | Despreciable                   |

Fuente: González, J. (2014).

### 1.6.7 Nordtest NT-492 (NordTest 1999).

El ensayo Nordtest NT -492 se creó con el fin de obtener resultados más fáciles y directos que los ensayos tradicionales, el cual cuenta con la base necesaria para el cálculo del Coeficiente de Difusión.<sup>23</sup>

A través del tiempo, se han modificados las leyes de Fick nombradas ahora como ecuaciones de Nerst - Planck en las cuales buscan dar solución al potencial de difusión electroquímico en medios ideales. En la siguiente ecuación se observa la incorporación del campo eléctrico, siendo muy importante y de gran ayuda en los ensayos de migración.

$$J_i = J_{i,dif} + J_{i,mig} = -D_i \frac{\partial C_i}{\partial x} - \frac{Z_i F}{RT} D_i C_i \frac{\partial E}{\partial x} \quad (\text{Ecuación 4})$$

$J_i$ : Flujo iónico (mol/m<sup>2</sup>/s).

$J_{i,dif}$ : Flujo iónico producido por difusión (mol/m<sup>2</sup>/s).

$J_{i,mig}$ : Flujo iónico producido por migración (mol/m<sup>2</sup>/s).

$C_i$ : Concentración de la especie iónica i en la solución de poros (mol/m<sup>3</sup>.)

$D_i$ : Coeficiente de difusión (m<sup>2</sup>/s).

$Z_i$ : Número de valencia.

$F$ : Constante de Faraday (Coulombs/mol).

$E$ : Potencial eléctrico (V).

$R$ : Constante de un gas ideal (J/mol/K).

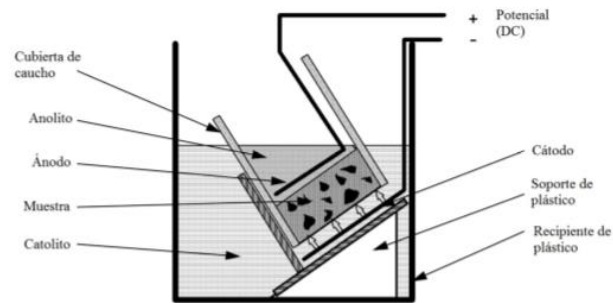
$T$ : Temperatura (T).

---

<sup>23</sup> NT BUILD 492, 1999. Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. Measurement, pp. 1-8. ISSN 0283-7153. DOI UDC 691.32/691.53/691.54.

Para realizar el montaje adecuado para el ensayo NT Build 492 (Nord Test 1999) se recomienda usar una muestra de concreto o mortero de 10 cm de diámetro y 5 cm de espesor; se puede ver un claro ejemplo en la Figura 5.

*Figura 5 Montaje esquemático del ensayo NT Build 492*



Fuente: González, J. (2014).

Para la determinación del coeficiente de difusión para un estado no estacionario se hace uso de la siguiente ecuación.

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273+T)}{(U-2)t} \left( x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273+T)Lx_d}{U-2}} \right) \text{ (Ecuación 8)}$$

$x_d$ : Promedio de la profundidad de los perfiles de penetración (mm).

$U$ : Valor absoluto del voltaje aplicado (V).

$T$ : Promedio de la temperatura inicial y final del anolito (°C).

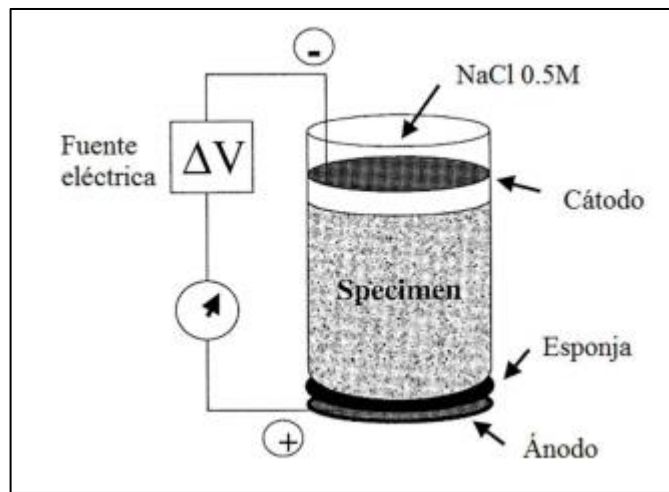
$t$ : Tiempo (h).



Castellote et al propuso otra forma para calcular el coeficiente de difusión para un estado no estacionario integrando una ecuación que permitiera el balance de masas de los iones presentes. la preparación de este ensayo consiste en que la muestra se debe encontrar separada en una solución de 0.5M de NaCl por medio de una malla de acero inoxidable, para separar la muestra del ánodo (disco de acero) se implementa una esponja y se debe aplicar un voltaje de 12 V; este tipo de ensayo tiene una duración entre 7 a 28 días.<sup>24</sup>

$$t_i = \frac{Z_i C_i A_i}{\sum Z_i C_i A_i}$$

*Figura 6 Ensayo para estado no estacionario*



Fuente: González, J. (2014).

<sup>24</sup> CASTELLOTE, M., FERNANDEZ, L., ANDRADE, C. y ALONSO, C., 2009. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO<sub>2</sub> concentrations. Materials and Structures [en línea], vol. 42, no. 4, pp. 515-525. ISSN 1359-5997. DOI 10.1617/s11527-008-9399-1. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/225332231/download>

### 1.6.8 Iones cloruro y otros agentes agresivos

La corrosión reforzada se genera debido a la acción de iones despasivantes que agreden a los grafites de acero. La mayor fuente de iones cloruro es el mar, en este se puede hallar cloruro de magnesio, cloruro de magnesio y el cloruro de potasio con unas concentraciones aproximadas de 25g/l, 5g/l y 5g/l respectivamente.

La corrosión localizada y por picadura son causadas por los cloruros, ya que despasivan la armadura generando rotura en las barras de refuerzo. Los cloruros libres actúan directamente cuando se comienza a producir la corrosión, los cloruros fijos inciden provisionalmente y los cloruros totales son el resultado de los dos anteriores. Para determinar el contenido de cloruros se usan los ensayos C1218 (ASTM 1992), que mide el contenido de cloruros libres; y el ensayo estándar C1152 (ASTM 1990) el cual describe un método para medir los cloruros totales.

El concreto se afecta desde el exterior debido a que las estructuras se encuentran expuestas a diferentes ambientes salinos o de constantes cambios de humedad y secado, pero también puede ser generada en los componentes para realizar la mezcla de concreto (relación agua/cemento).<sup>25</sup>

---

<sup>25</sup> STEVEN H. KOSMATKA, BEATRIX KERKHOFF, WILLIAM C. PANARESE, J.T., 2004. Diseño y Control de Mezclas de Concreto [en línea]. 1. Skokie, Illinois 60077-1083 EE.UU.: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. ISBN 0-89312233-5. Disponible en: [www.cement.org](http://www.cement.org).

### 1.6.9 Ceniza volante

La ceniza volante de carbón (CFA) es un subproducto del proceso de combustión del carbón que es pulverizado en centrales térmicas, y recuperado por medio de filtros. Estos residuos de combustión de carbón (CCR) están separados por dos grupos básicos: cenizas volantes y cenizas de fondo. La ceniza volante se puede definir como un subproducto sólido y en estado de fina división procedente de la combustión de carbón, donde se usa beneficiosamente o se desecha como un producto de desecho<sup>26</sup>.

En estados unidos la clasificación de ceniza volante se divide en dos categorías (clase C y clase F): La clase C (CA-C) tiene un contenido de calcio mucho más alto que las cenizas volantes de clase F (CA-F) este exceso de calcio es responsable de la naturaleza auto cementante de CA-C ya que las principales fases reactivas para CA-C son sulfato de calcio ( $\text{CaSO}_4$ ) e hidróxido de calcio ( $\text{CaOH}$ ). Sin embargo, este alto contenido de calcio puede producir efectos nocivos cuando se usan en mezclas de concreto<sup>27</sup>. Se produce a partir de carbón subbituminoso que se usa principalmente como el combustible para la generación de la energía eléctrica del vapor, o de lignito.

La clase F (CA-F) se producen a partir de carbón bituminoso. La fuente de combustible que crean estas cenizas produce un material que tiene una composición química diferente, pero tiene características físicas similares a CA-C.

---

<sup>26</sup> SUDHA, U., VINITA, V., P, G.R., D., R., KALPANA, K., R, P., M, P., R, R., MUDALI, U.K. y AMARENDRA, G., 2018. Enhancement of strength and durability of fly ash concrete in seawater environments: Synergistic effect of nanoparticles. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 187, pp. 448-459. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.214. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.214>

<sup>27</sup> PARIS JERRY M., ROESSLER JUSTIN G., FERRARO CHRISTOPHER C., DEFORD HARVEY D., T.T.G., 2016. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 121, pp. 1-18. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.02.013. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>

Por lo tanto, muchos de los efectos que se deben a las características físicas (a diferencia de las reacciones químicas) son similares a los de CA-C<sup>28</sup>.

#### ✓ **Propiedades físicas**

Las propiedades físicas de las cenizas volantes tienen las siguientes características; textura arenosa o polvo muy fino, suave al tacto y de un color gris claro. Sus propiedades también dependen de múltiples factores entre los que cabe resaltar: la composición química de los componentes incombustibles del carbón, el grado de pulverización, el tipo de caldera que se usó, la temperatura de combustión, el tipo de extractor, el sistema por el cual las cenizas son retiradas de la central térmica.<sup>29</sup>

#### ✓ **Propiedades químicas**

La composición química de las cenizas volantes es muy variable dependiendo de la composición química de los componentes del carbón. Los porcentajes en los que se presentan los distintos componentes de la ceniza varían sustancialmente de unas a otras.

En general poseen los siguientes componentes, en mayor proporción: sílice ( $\text{SiO}_2$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxidos de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), cal ( $\text{CaO}$ ) y carbón sin quemar;

---

<sup>28</sup> *Ibíd.*

<sup>29</sup> VALENCIA, S. y ELENA, L., 2001. Caracterización física química y mineralógica de las cenizas volantes. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* [en línea], vol. 10, pp. 47-62. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101007>.

en menor proporción, generalmente menor del 5% en peso: magnesia ( $\text{MgO}$ ), óxido de azufre ( $\text{SO}_3$ ), alcalinos ( $\text{Na}_2\text{O}$  y  $\text{K}_2\text{O}$ ), y, otros constituyentes en cantidades aún más reducidas, como compuestos de titanio, vanadio, manganeso, fósforo, germanio, galio, etc.<sup>30</sup>

Las cenizas volantes se clasifican en diferentes tipos, atendiendo principalmente a su contenido en cal, y según la Norma ASTM C 618-08a, se definen:

- Clase F

Ceniza volante derivada de la combustión de antracitas y carbones bituminosos y su composición es mayor del 70% de óxidos ácidos.

- Clase C

Son desarrolladas a partir de la incineración de lignitos y carbones subbituminosos y su estructura es mayor del 50% de óxidos ácidos, en algunos casos puede llegar a contener proporciones superiores al 10% de cal libre ( $\text{CaO}$ ).

## ✓ Aplicaciones y usos

La ceniza volante es un mineral poco utilizado en nuestro país, debido a la poca divulgación acerca de los beneficios que esta puede generar en el concreto,

---

<sup>30</sup> Ibid.

mientras que en países de mayor desarrollo tecnológico se utiliza como subproducto para la elaboración de cementos y concretos.

Una de las ventajas de la adición de la ceniza volante al concreto es la reducción de su costo, ya que aparte de mejorar sus propiedades mecánicas posee una alta resistencia al ataque químico sobre todo cloruros y aumenta la resistencia a la compresión del concreto.

Este producto puede mezclarse en fábrica con el cemento, o puede ser añadido directamente en el concreto o mortero; aumentando las propiedades mecánicas como por ejemplo el incremento de la permeabilidad, durabilidad, resistencia a compresión a largo plazo, resistencia a los ciclos hielos-deshielos y ahorro del cemento en las mezclas de concreto.<sup>31</sup>

#### **1.6.10 Mortero**

Es un material de construcción que está elaborado a partir de una mezcla previa de agregados finos, cal, agua, aditivos y cemento. Se caracteriza por tener una buena resistencia a la compresión y por no contar dentro de su estructura con grafites o fibras de acero para resistir las tensiones, por lo general se emplea en la construcción para actividades de mampostería y para dar acabados.<sup>32</sup>

---

<sup>31</sup> CÁCERES HUAQUISTO, S. y BELIZARIO QUISPE, G., 2018. Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. Revista de Investigaciones Altoandinas [en línea], vol. 20, no. 2, pp. 225-234. Disponible en: <http://huajsapata.unap.edu.pe/ria/index.php/ria/article/view/366/334>.

<sup>32</sup> SÁNCHEZ GUZMÁN, DIEGO. 2001. Tecnología del Concreto y del Mortero. Santafé de Bogotá: Bhandar Editores,. Págs. 214.Vol.5

El mortero presenta las siguientes propiedades físicas:

- Trabajabilidad

Esta propiedad puede ser buena o mala dependiendo de qué tan fluida se encuentre la mezcla. También se afecta por la cohesión y la plasticidad, sin embargo, varía por la porosidad y el lugar donde se realice la mezcla.

- Fluidez

Capacidad de poder circular con normalidad y que está directamente relacionada con el porcentaje de agua que contiene el mortero. La medición de esta se desarrolla en ambientes experimentales de laboratorio.

- Penetración

Cualidad que posee el mortero para permitir que se afecte su dureza por una acción de punzonamiento.

- Retención de agua

Se define como la capacidad que tiene el mortero para conservar el agua cuando se aplica en piezas de mampostería como los bloques de arcilla y los ladrillos. Una mala retención del agua genera una pésima trabajabilidad, sin embargo, la retención de agua se puede mejorar con cal o con un agregado fino que brinde una óptima retención del fluido.

- Contenido de aire

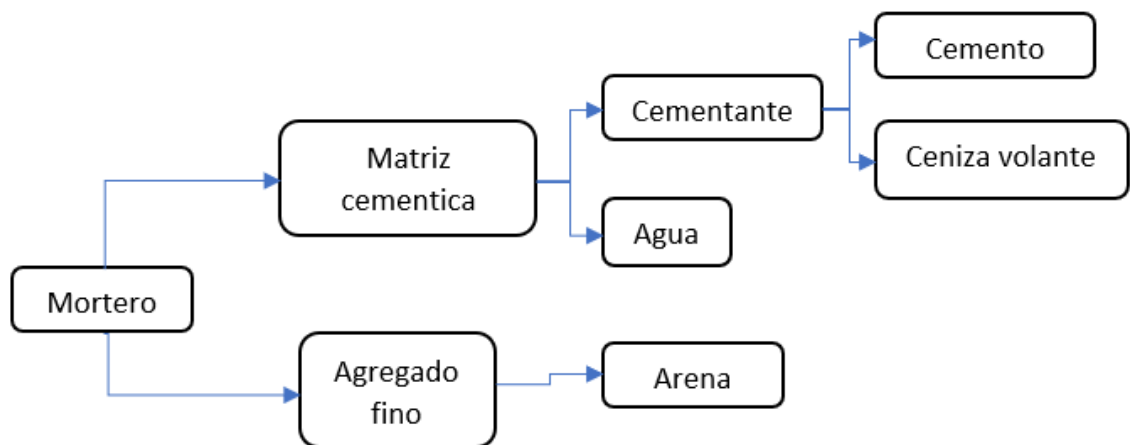
Propiedad del mortero que en pequeñas proporciones mejora la cohesión y la durabilidad, de tal manera que puede incluso prevenir daños por causas térmicas.

### ✓ Componentes del mortero

- Cemento

Es un material que se compone esencialmente de roca caliza, yeso, arcilla y partículas de minerales, su función es generar la adherencia a los agregados finos y demás componentes del mortero.

*Figura 7 Composición del mortero*



*Fuente: Elaboración propia*



### ✓ Composición química del cemento

Este material se elabora en las fábricas facultadas con los siguientes compuestos que se encuentran en la roca caliza, arcilla y los minerales.

- Sílice  $\text{SiO}_2$
- Oxido de calcio  $\text{CaO}$
- Oxido fierro (III)  $\text{Fe}_2\text{O}_3$
- Alúmina  $\text{Al}_2\text{O}_3$

### ✓ Tipos de cemento

Los cementos se organizan de acuerdo con unas cualidades y los componentes de la siguiente forma.

- Tipo 1: Es un cemento de propiedades ordinarias y que no es de alta calidad.
- Tipo 2: Cemento que soporta muy regular la acción química de los sulfatos y el aumento de la temperatura por acción del fenómeno de la hidratación.
- Tipo 3: Mezcla diseñada para ofrecer una alta resistencia en menor tiempo.
- Tipo 4: Por lo general este tipo de cemento cuando se requieren grandes volúmenes de cemento.
- Tipo 5: Tiene la capacidad de resistir de degradación por sulfatos, a diferencia del cemento tipo 2, este tiene una alta resistencia y por ende se usa en puertos y zonas costeras.

## ✓ **Ceniza industrial o volante**

Desecho que se produce cuando una planta termoeléctrica hace el proceso de incineración del carbón. Una vez se retira de las calderas es refinado hasta transformarse en diminutas partículas.

- Agua

Fluido que se emplea en la mezcla de mortero y que colabora en la hidratación del cemento, además regula la trabajabilidad y su porcentaje volumétrico está ligado estrechamente con la cantidad de cemento y arena.

- Agregados

Material granular fino que debe cumplir con una granulometría, bien sea arena natural y sintética u otro tipo de agregado. El agregado cumple la función de aportar la resistencia a la compresión y un aumento de agregado significa mayor tiempo requerido para endurecerse e inversamente reduce las fisuras por retracción.

- Aditivos

Sustancia que se utiliza para modificar las propiedades físicas y químicas del mortero según los requerimientos. Algunos de los aditivos más comunes son incorporadores de aire, acelerantes, aditivos para larga vida, retardantes,

repelentes de agua integrales, modificadores de adherencia, pigmentos colorantes e inhibidores de corrosión.

### ✓ **Clasificación del mortero**

Se clasifica de acuerdo con su composición

- Morteros de cemento Portland

Tipo de mortero con una mala trabajabilidad y poca capacidad de retener el agua, además presenta una plasticidad muy regular. También se mezcla con arena para mejorar la resistencia a la compresión, y de igual forma aumenta su susceptibilidad a la aparición de fisuras. La proyección de grietas se controla al adicionar cal, pero se disminuye la resistencia a compresión<sup>33</sup>.

- Mortero de cemento de mampostería

Se definen como morteros que están compuestos por cemento Portland, caliza, plastificantes y otros aditivos. Este tipo de mortero ofrece una buena duración y una óptima consistencia para trabajar.

Debido a que se agrega múltiples aditivos y en distintos porcentajes, se subdivide en lo siguiente de acuerdo con la Norma Técnica Colombiana.

---

<sup>33</sup> Ibíd

Mortero tipo M: Se caracteriza por ser la mezcla con mayor durabilidad y se aplica en mampostería de refuerzo.

Mortero tipo S: Es la mezcla con mejor adherencia y se usa para enchapes.

Mortero tipo N: Tiene una relación balanceada del trabajabilidad y resistencia, por ende, es de gran utilidad para pañetar.

Mortero tipo O: Es un mortero muy económico y con alta trabajabilidad, recomendable para pañetes y paredes divisorias.

✓ Por sistema de producción:

- Mortero mezclado en obra

Tipo de mezcla que requiere de un ambiente in situ idóneo que garantice que no se vayan a contaminar los componentes del mortero.

- Morteros premezclados o predosificados

Son mezclas que se realizan previamente con agregados, aditivos y cal, excluyendo el agua y el cemento; que luego son transportadas a la obra para que allí se disponga.

✓ Por el tiempo de fraguado

Los morteros se pueden clasificar de acuerdo con su velocidad para endurecerse, la cual puede controlarse a través de aditivos. En ilustración 2 se aprecia los criterios para su organización.

*Tabla 2 Tiempo de fraguado*

| TIPO DE ADITIVO  | DESVIACIÓN DE LOS TIEMPOS DE FRAGUADO RESPECTO A MORTEROS SIN ADITIVOS | TIEMPO DE FRAGUADO |
|------------------|--|--------------------|
| Retardante       | De 1 a 3 horas después   | Lento              |
| Reductor de agua | Entre 1 hora y 1 y 30 minutos  | Normal             |
| Acelerante       | De 1 a 3 y 30 minutos  | Rápido             |

*Fuente: Elaboración propia*

- ✓ Por el módulo de finura de la arena

Clasificación de morteros que se basa en una organización a partir del módulo de finura, es decir, la granulometría de la mezcla. Con base en dicha granulometría se relaciona el tipo de uso que se le asigna en la construcción.

*Tabla 3 Módulo de finura*

| TIPO DE MORTERO | MODULO DE FINURA | USOS                          |
|-----------------|------------------|-------------------------------|
| Finos           | 1.8-2.3          | Muros y techos                |
| Medios          | 2.3-2.7          | Pegado de mampostería         |
| Gruesos         | 2.7-3.2          | Pisos, relleno de mampostería |

*Fuente: Elaboración propia*

- ✓ Por la resistencia a la compresión

Organización cualitativa de los morteros, fundamentada en la resistencia de la mezcla a fuerzas inducidas paralelamente al eje axial.

*Tabla 4 Resistencia a la compresión*

| MORTERO<br>TIPO | Mpa  | RESISTENCIA        |       |
|-----------------|------|--------------------|-------|
|                 |      | kg/cm <sup>2</sup> | P.S.I |
| M               | 17.2 | 175                | 2500  |
| S               | 12.4 | 126                | 1800  |
| N               | 5.2  | 53                 | 750   |
| O               | 2.4  | 25                 | 350   |
| K               | 0.5  | 5                  | 75    |

*Fuente: Elaboración propia*

## 1.7 MARCO LEGAL

NTC 118 - Ingeniería Civil y Arquitectura. Cementos. Método De Ensayo para Determinar el Tiempo de Fraguado del Cemento Hidráulico Mediante el Aparato de Vicat.

NTC 127 - Concretos. Método de Ensayo para Determinar las Impurezas Orgánicas en Agregado Fino

NTC 1377 - Ingeniería Civil y Arquitectura. Elaboración y Curado de Especímenes de Concreto para Ensayos en el Laboratorio.

NTC 176 - Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de Ensayo para Determinar la Densidad y la Absorción del Agregado Grueso.

NTC 221 - Ingeniería Civil y Arquitectura. Cementos. Método de Ensayo para Determinar la Densidad del Cemento Hidráulico.

NTC 237 - Ingeniería Civil y Arquitectura. Método para Determinar la Densidad y la Absorción del Agregado Fino.

NTC 33 - Ingeniería Civil y Arquitectura. Método para Determinar la Finura del Cemento Hidráulico por Medio del Aparato Blaine de Permeabilidad al Aire.

NTC 396 - Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de Ensayo para Determinar el Asentamiento del Concreto.

NTC 4025 - Concretos. Método de Ensayo para Determinar el Módulo de Elasticidad Estático y la Relación de Poisson en Concreto a Compresión.

NTC 4325 - Ingeniería Civil y Arquitectura. Método de Ensayo para la Determinación de la Velocidad del Pulso Ultrasónico a Través del Concreto.

NTC 454 - Ingeniería Civil y Arquitectura. Toma de Muestras.

NTC 673 - Concretos. Ensayo de Resistencia a la Compresión de Especímenes Cilíndricos de Concreto.

NTC 77 - Concretos. Método de Ensayo para el Análisis por Tamizado de los Agregados Finos y Gruesos

NTC 92 - Ingeniería Civil y Arquitectura. Determinación de la Masa Unitaria y los Vacíos entre Partículas de Agregados.

NT BUILD 492 - Non-Steady State Chloride Migration (Diffusion Coefficient).

## 1.8 METODOLOGÍA

La metodología para el desarrollo de este proyecto se divide en 7 fases:

✓ Fase de consulta:

Periodo en el cual se realiza la debida consulta de información y revisión bibliográfica que permita entender de forma teórica cómo es el comportamiento del mortero en presencia del ion cloruro. Además, se indagarán los efectos que ocasionan la adición mineral (ceniza volante) empleados como material cementantes suplementarios en un diseño de mezcla de mortero.

✓ Diseño de Mezcla:

Se realizará un diseño de mezcla con adición de ceniza volate variando su porcentaje de remplazo.

✓ Caracterización de los componentes:

Se realizarán ensayos de caracterización del cemento, agregados y ceniza volante; dentro de los ensayos para caracterizar el cemento tenemos: finura y



densidad, para los agregados: granulometría y masa unitaria (suelta y compacta) y por último para la ceniza volante: fotografía e inquemados.

✓ Elaboración de probetas de mortero

✓ Caracterización mecánica del mortero:

Se elaborarán ensayos para determinar las propiedades mecánicas de las probetas de mortero, tanto en estado fresco como en estado endurecido.

✓ Ejecución del ensayo de migración del ion cloruro (NT.- BUILD 492)

✓ Análisis de resultados:

Interpretar los datos obtenidos en los ensayos para evaluar cómo afecta la adición de ceniza volante en el comportamiento del objeto de estudio.

## **1.9 TIPO DE ESTUDIO**

Trabajo de investigación en el que se aplican los conceptos de resistencia de materiales y propiedades físicas del mortero para conocer el comportamiento de la penetración del ion cloruro.

## 2 CARACTERIZACIÓN DE MATERIAS PRIMAS

### 2.1 AGREGADO ARENA SILÍCEA

#### 2.1.1 Humedad Natural

La humedad natural es la cantidad de agua que posee un agregado en estado natural. Es un procedimiento sencillo para determinar su porcentaje de humedad.

De acuerdo con la norma NTC-1776, consiste en pesar una cantidad mayor a 200g de agregado en su estado natural, posteriormente se coloca en el horno a una temperatura de  $100 \pm 5^{\circ}\text{C}$  por 24 horas. Después de transcurrido dicho tiempo, se vuelve a pesar, por lo que la humedad natural ( $w$ ) se halla mediante la siguiente expresión:

Los datos obtenidos en el ensayo se ven reflejados en la siguiente tabla.

*Tabla 5 Datos Obtenidos Ensayo de Humedad*

| Material | Wn (g) | Ws (g) |
|----------|--------|--------|
| #12      | 500    | 499.8  |
| #30      | 500    | 499.6  |

Fuente: Elaboración Propia

El porcentaje de humedad natural se determina con la siguiente formula:

$$w(\%) = \frac{W_n - W_s}{W_s} \times 100$$

Donde:

$W_n$ : Peso natural de la muestra

$W_s$ : Peso seco de la muestra

Para el Material #12

$$w(\%) = \frac{500 - 499.8}{500} \times 100 = 0,04\%$$

Para el Material #30

$$w(\%) = \frac{500 - 499.8}{500} \times 100 = 0,08\%$$

Para los agregados utilizados en el presente trabajo se obtuvieron los siguientes datos:

*Tabla 6 Resultados Ensayo Humedad Natural*

| Material | Wn (g) | Ws (g) | w (%) |
|----------|--------|--------|-------|
| #12      | 500    | 499.8  | 0.04  |
| #30      | 500    | 499.6  | 0.08  |

Fuente: Elaboración Propia

### 2.1.2 Absorción

La absorción indica el incremento o cambio en la masa del agregado debido al agua absorbida en los poros del material, pero sin incluir el agua adherida a la superficie exterior de las partículas, expresado como un porcentaje de la masa seca.

La elaboración de este ensayo se siguen las indicaciones hechas en la NTC-237, consiste en dejar saturar la muestra durante 24 horas, y después se pesa una muestra no menor a 200 gr seca superficialmente. Esta muestra se lleva al horno a una temperatura de  $100 \pm 5^\circ\text{C}$  por 24 horas y posteriormente se pesa la muestra seca.

Los datos obtenidos en el ensayo se ven reflejados en la siguiente tabla.

*Tabla 7 Datos Obtenidos Ensayo de Absorción*

| <b>Material</b> | <b><math>W_{sss}</math><br/>(g)</b> | <b><math>W_s</math><br/>(g)</b> |
|-----------------|-------------------------------------|---------------------------------|
| #12             | 500                                 | 486.3                           |
| #30             | 500                                 | 485.7                           |

Fuente: Elaboración Propia

El porcentaje de absorción se determina con la siguiente formula:

$$Absorción(\%) = \frac{W_{sss} - W_s}{W_s} \times 100$$

Donde:

$W_{SSS}$ : Peso Húmedo de la muestra

$W_s$ : Peso seco de la muestra

Para el Material #12

$$w(\%) = \frac{500 - 486.3}{486.3} \times 100 = 2,23\%$$

Para el Material #30

$$w(\%) = \frac{500 - 485,7}{485,7} \times 100 = 2,94\%$$

Para los agregados utilizados en el presente trabajo se obtuvieron los siguientes datos:

*Tabla 8 Resultados Ensayo de Absorción*

| <b>Material</b> | <b><math>W_{SSS}</math><br/>(g)</b> | <b><math>W_s</math><br/>(g)</b> | <b>Absorción<br/>(%)</b> |
|-----------------|-------------------------------------|---------------------------------|--------------------------|
| #12             | 500                                 | 486.3                           | 2.83                     |
| #30             | 500                                 | 485.7                           | 2.94                     |

Fuente: Elaboración propia

### 2.1.3 Densidad y Peso Específico

La densidad es una propiedad ( $\delta$ ) física de los agregados que indica el volumen ocupado en la mezcla y está definida por la relación entre la masa y el volumen de un agregado determinado, lo que significa que depende directamente de las características del grano de agregado. Para este ensayo se siguen las recomendaciones hechas en la NTC 237. Este ensayo consiste en tomar una muestra de más de 200 gr de agregado y depositarlo en una probeta con agua para determinar cuál es el volumen que ocupa dicho material, posteriormente se seca esta muestra en el horno, y se pesa.

Los datos obtenidos durante el ensayo se encuentran en la siguiente tabla.

*Tabla 9 Datos Obtenidos Ensayo Densidad*

| <b>Material</b> | <b>W<sub>s</sub> (g)</b> | <b>V muestra (ml)</b> |
|-----------------|--------------------------|-----------------------|
| #12             | 499.80                   | 190                   |
| #30             | 420.80                   | 160                   |

Fuente: Elaboración Propia

La densidad se halla mediante la siguiente expresión:

$$\delta = \frac{W_s}{V}$$

Donde:

$W_s$  = Peso de la muestra seca

$V$  = Volumen que ocupa la muestra.

Por otro lado, el peso específico ( $\gamma$ ) es la relación entre el peso de una muestra de agregado y su volumen, por lo que se halla mediante la expresión:

$$\gamma = \delta * g$$

Donde:

$\delta$  = Densidad de la muestra.

$g$  = Gravedad (Asumida como 9.81 m/s<sup>2</sup>)

Para el Material #12

$$\delta = \frac{499.8}{190} = 2,63 \text{ } g/cm^3$$

$$\gamma = 2,63 * 10 = 26,31 \frac{kN}{m^3}$$

Para el Material #30

$$\delta = \frac{420.8}{190} = 2,63 \text{ g/cm}^3$$

$$\gamma = 2,63 * 10 = 26,30 \frac{kN}{m^3}$$

De este modo, las densidades y pesos específicos que tienen los agregados usados en la presente tesis son:

*Tabla 10 Resultados Ensayos de Densidad y Peso Específico del agregado.*

| Material | W <sub>s</sub> (g) | V total (ml) | V muestra (ml) | δ (g/cm <sup>3</sup> ) | γ (KN/m <sup>3</sup> ) |
|----------|--------------------|--------------|----------------|------------------------|------------------------|
| #12      | 499.80             | 440          | 190            | 2.63                   | 26.31                  |
| #30      | 420.80             | 410          | 160            | 2.63                   | 26.30                  |

Fuentes: Elaboración propia

#### **2.1.4 Masa unitaria suelta**

Se define como la masa que se encuentra en su estado normal de reposo ya que el volumen que ocupa es mayor, así que su masa unitaria es menor.

La masa unitaria es la relación entre la masa de un agregado y el volumen que ocupa, y se diferencia de la densidad en que para hallar la masa unitaria se tiene en cuenta el volumen de vacíos.



Para hallar la masa unitaria suelta se utilizan los procedimientos descritos en la NTC-092. El procedimiento consiste en llenar el molde de 2500 ml con el agregado hasta el borde y nivelar. Posteriormente se pesa.

Los datos obtenidos durante el ensayo se encuentran en la siguiente tabla.

*Tabla 11 Datos Obtenidos Ensayo Masa Unitaria*

| <b>Material</b> | <b><math>W_{mm}</math><br/>(g)</b> | <b><math>W_m</math><br/>(g)</b> |
|-----------------|------------------------------------|---------------------------------|
| #12             | 6854                               | 2715                            |
| #30             | 6826                               | 2715                            |

Fuente: Elaboración propia.

El cálculo de la masa unitaria se basa de la siguiente expresión

$$M_{US} = \frac{W_{mm} - W_m}{V_m}$$

Donde:

$M_{US}$  = Masa Unitaria Suelta

$W_{mm}$  = Peso del material y el molde

$W_m$  = Peso del molde.

$V_m$  = Volumen del molde, en este caso 2500 ml o 2500 cm<sup>3</sup>.

Para el Material #12

$$M_{US} = \frac{6854 - 2715}{2500} = 1,66 \frac{g}{cm^3}$$

Para el Material #30

$$M_{US} = \frac{6826 - 2715}{2500} = 1,64 \frac{g}{cm^3}$$

Los valores de masa unitaria suelta encontrados en este material fueron:

*Tabla 12 Masa unitaria suelta (gr/cm<sup>3</sup>) del agregado.*

| Material | W <sub>s</sub> (g) | V total (ml) | V muestra (ml) | δ (g/cm <sup>3</sup> ) | γ (KN/m <sup>3</sup> ) |
|----------|--------------------|--------------|----------------|------------------------|------------------------|
| #12      | 499.80             | 440          | 190            | 2.63                   | 26.31                  |
| #30      | 420.80             | 410          | 160            | 2.63                   | 26.30                  |

*Fuente: Elaboración Propia*

### 2.1.5 Masa unitaria compactada

La masa unitaria compacta es el grado de acomodamiento de las partículas del agregado cuando se han sometido a vibración o apisonamiento ya que esto mejora el acomodamiento y aumenta la masa unitaria.

La masa unitaria se halla de forma similar a la masa unitaria suelta. La diferencia radica en que, para hallar la masa unitaria compactada, se divide el llenado del molde en tres etapas. Primero se llena hasta la tercera parte con agregado y se apisona 25 veces con una varilla. Se hace lo mismo con las otras dos capas hasta llenar el molde hasta el borde. Posteriormente se pesa todo.

Los datos obtenidos durante el ensayo se encuentran en la siguiente tabla.

*Tabla 13 Datos Obtenidos Ensayo Masa Unitaria Compactada*

| <b>Material</b> | <b><math>W_{mm}</math><br/>(g)</b> | <b><math>W_m</math><br/>(g)</b> |
|-----------------|------------------------------------|---------------------------------|
| #12             | 7154                               | 2715                            |
| #30             | 7198                               | 2715                            |

Fuente: Elaboración Propia

La masa unitaria compactada se halla con la siguiente expresión:

$$M_{UC} = \frac{W_{mm} - W_m}{V_m}$$

Donde:

$M_{UC}$  = Peso del material y el molde

$W_{mm}$  = Peso del material y el molde

$W_m$  = Peso del molde.

$V_m$  = Volumen del molde, en este caso 2500 ml o 2500 cm<sup>3</sup>.

Para el Material #12

$$M_{US} = \frac{7154 - 2715}{2500} = 1,78 \frac{g}{cm^3}$$

Para el Material #30

$$M_{US} = \frac{7198 - 2715}{2500} = 1,79 \frac{g}{cm^3}$$

Los valores de masa unitaria compactada encontrados en este material fueron:

*Tabla 14 Masa unitaria compactada (gr/cm3) del agregado.*

| Material | W <sub>mm</sub><br>(g) | W <sub>m</sub><br>(g) | V <sub>m</sub><br>(ml) | M <sub>uc</sub><br>(g/cm3) |
|----------|------------------------|-----------------------|------------------------|----------------------------|
| #12      | 7154                   | 2715                  | 2500                   | 1.78                       |
| #30      | 7198                   | 2715                  | 2500                   | 1.79                       |

Fuente: Elaboración Propia

### 2.1.6 Granulometrías del agregado

El análisis granulométrico del agregado tiene por objeto determinar las cantidades en que están presentes partículas de ciertos tamaños en el material. La prueba

consiste en hacer pasar la muestra a través de diferentes mallas y determinar el porcentaje de material que se retiene en cada una.

En la norma de la NTC 174 (ASTM C-33), se estipulan todos los requerimientos que se deben tener en cuenta para hacer una granulometría. Para este trabajo se utilizaron dos tipos de combinaciones de mallas, las cuales fueron:

✓ Mallas: 4, 10, 12, 16, 20, 30, 40, 50, 60, 80, 100 y 200.

La disposición de las mallas y el equipo utilizado para hacer cada una de las granulometrías se muestra a continuación:

*figura 8. Procedimiento de la granulometría*



Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se muestra la granulometría de cada uno de los agregados utilizados.

### **Agregado #12**

La granulometría obtenida para el agregado #12, se muestra a continuación:

*Tabla 15 Granulometría del agregado #12.*

| TAMIZ | PESO<br>RETEN.<br>(G) | % QUE<br>PASA | %<br>RETENIDO | % RETENIDO<br>ACUMULADO |
|-------|-----------------------|---------------|---------------|-------------------------|
| 4     | 0                     | 100           | 0             | 0                       |
| 10    | 0.6                   | 99.4          | 0.6           | 0.6                     |
| 12    | 12.6                  | 86.8          | 12.6          | 13.2                    |
| 16    | 71.5                  | 15.4          | 71.4          | 84.6                    |
| 20    | 14.1                  | 1.3           | 14.1          | 98.7                    |
| 30    | 1.3                   | 0             | 1.3           | 100                     |
| 40    | 0                     | 0             | 0             | 100                     |
| 50    | 0                     | 0             | 0             | 100                     |
| 60    | 0                     | 0             | 0             | 100                     |
| 80    | 0                     | 0             | 0             | 100                     |
| 100   | 0                     | 0             | 0             | 100                     |
| 200   | 0                     | 0             | 0             | 100                     |
| FONDO | 0                     | 0             | 0             |                         |
| TOTAL | 100.1                 |               |               |                         |

Fuente: Elaboración Propia

Con estos datos se logra graficar la siguiente curva de gradación para el agregado #12:

Gráfica 1 Curva de gradación del agregado # 12



Fuente: Elaboración Propia

### **Agregado #30**

La granulometría obtenida para el agregado #30, se muestra a continuación:

*Tabla 16 Granulometría del agregado #30.*

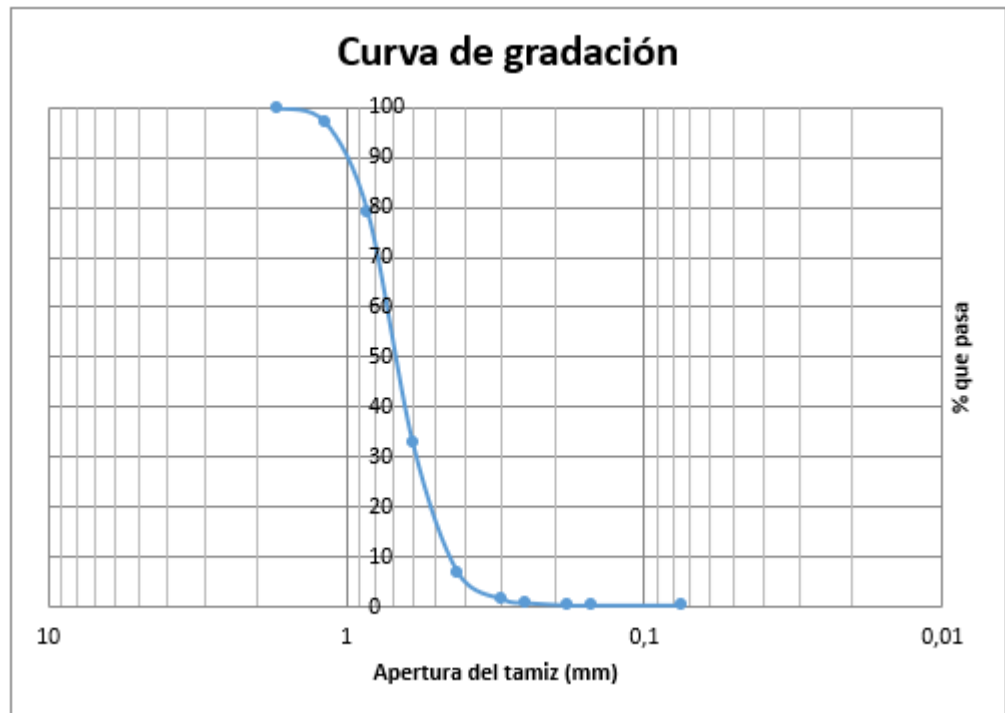
| TAMIZ | PESO<br>RETEN. (G) | % QUE<br>PASA | %<br>RETENID<br>O | % RETENIDO<br>ACUMULAD<br>O |
|-------|--------------------|---------------|-------------------|-----------------------------|
| 0     | 0                  | 100           | 0                 | 0                           |
| 10    | 0                  | 100           | 0                 | 0                           |
| 12    | 0                  | 100           | 0                 | 0                           |
| 16    | 2.9                | 97.1          | 2.9               | 2.9                         |
| 20    | 18.1               | 79            | 18.1              | 21                          |
| 30    | 46.2               | 32.7          | 46.3              | 67.3                        |
| 40    | 25.6               | 7             | 25.7              | 93                          |
| 50    | 5.4                | 1.6           | 5.4               | 98.4                        |
| 60    | 0.7                | 0.9           | 0.7               | 99.1                        |
| 80    | 0.5                | 0.4           | 0.5               | 99.6                        |
| 100   | 0                  | 0.4           | 0                 | 99.6                        |
| 200   | 0                  | 0.4           | 0                 | 99.6                        |
| FONDO | 0.4                | 0             | 0.4               |                             |
| TOTAL | 99.8               |               |                   |                             |

Fuente: Elaboración Propia



Con estos datos se logra graficar la siguiente curva de gradación para el agregado #30:

Gráfica 2 Curva de gradación del agregado #30

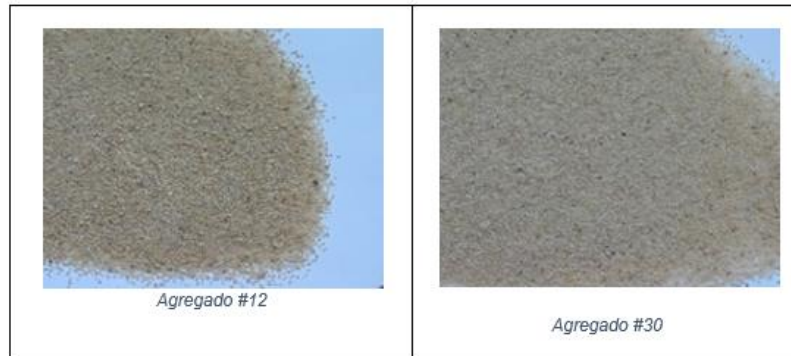


Fuente: Elaboración Propia

## 2.2 FOTOGRAFÍAS DEL AGREGADO

Aunque ya se definieron prácticamente todos los parámetros mecánicos del agregado, se pueden obtener caracterizaciones de otro tipo que contribuyan a la identificación del material. Para tal fin, a continuación, se muestran fotografías de cada uno de los agregados utilizados:

*Figura 9 Agregado utilizados*



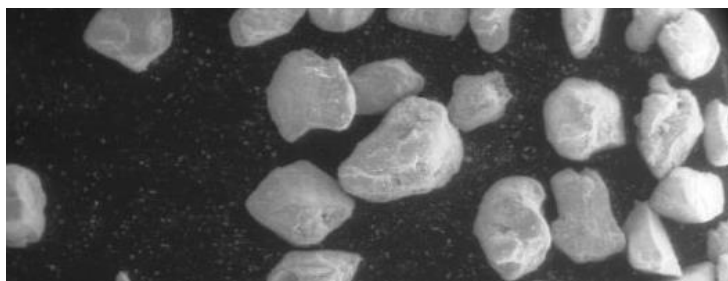
Fuente: Elaboración Propia

### **2.2.1 Fotografías microscópicas del agregado**

Con estas fotografías se brinda información más detallada acerca de la forma de los agregados, si de verdad se quiere saber cómo es la microestructura de los agregados, se deben tomar fotografías con mayor aumento, que permitan visualizar como es la forma, la geometría y la superficie del agregado.

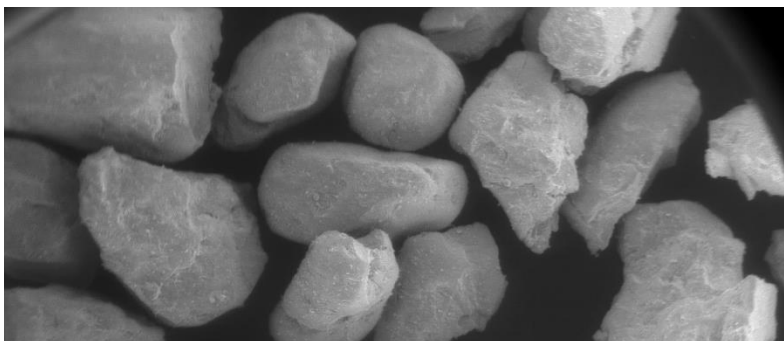
Por tal motivo, a continuación, se muestran fotografías de todos los agregados, tomadas con un microscopio de los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia.

*Figura 10 Agregado #30 Aumento 34x*



Fuente: Elaboración propia

*Figura 11 Agregado #12 Aumentado 34x*



Fuente: Elaboración propia

### **2.3 PRUEBA DE FLUORESCENCIA DE RAYOS X**

En la determinación de la característica química nos permite conocer cuál es la composición de estos agregados. Para tal fin se hizo un ensayo de fluorescencia de rayos X en las instalaciones de la Universidad Nacional de Colombia financiado por el proyecto a cargo del ingeniero Camilo Higuera

En la siguiente tabla se pueden identificar casi los elementos y compuestos químicos que conforman agregado.

Tabla 17 Composición química de la arena para la fabricación de las muestras.

| Elemento y/o compuesto         | % en peso |
|--------------------------------|-----------|
| SiO <sub>2</sub>               | 97.821    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.981     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0.693     |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.169     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.097     |
| MgO                            | 0.095     |
| CaO                            | 0.064     |
| K <sub>2</sub> O               | 0.027     |
| Cr                             | 0.018     |
| Zr                             | 0.013     |
| MnO                            | 0.011     |
| SiO <sub>2</sub>               | 0.005     |
| Sr                             | 0.004     |
| Zn                             | 0.002     |

Fuentes: Elaboración Propia

## 2.4 CEMENTO

Como se había indicado anteriormente el cemento utilizado para la fabricación de las muestras de concreto fue cemento ARGOS Tipo UG. La caracterización de este material fue más sencilla que la de los agregados, debido a que proviene de un proceso estandarizado.

### 2.4.1 Parámetros físicos y químicos del cemento

De acuerdo con esto, los parámetros físicos del cemento para elaborar las muestras de mortero son:

*Tabla 18 Parámetros físicos del cemento utilizado en los ensayos.*

| Parámetros                    |      |
|-------------------------------|------|
| Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) | 2.95 |
| Fraguado inicial mínimo (min) | 90   |
| Fraguado final máximo (min)   | 320  |
| Resistencia a 3 días (MPa)    | 9.0  |
| Resistencia a 7 días (MPa)    | 16.0 |
| Resistencia a 28 días (MPa)   | 26.0 |

*Fuente: Elaboración Propia*

Además, también se tienen los parámetros químicos del cemento utilizado para la fabricación de las muestras de concreto, los cuales son:

*Tabla 19 Parámetros químicos del cemento utilizado en los ensayos*

| Parámetros |      |
|------------|------|
| MgO (%)    | 6.00 |
| SO (%)     | 3.50 |

Fuente: Elaboración Propia

#### **2.4.2 Prueba de fluorescencia de rayos X**

Al cemento se le pudo realizar la prueba de fluorescencia de igual forma que se hizo con los agregados. Mediante este ensayo se puede conocer toda la composición química del dicho cemento, la cual muestra que:

Tabla 20 Composición química del cemento para la fabricación de las probetas.

| Elemento y/o compuesto         | % en peso |
|--------------------------------|-----------|
| CaO                            | 60.416    |
| SiO <sub>2</sub>               | 21.465    |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5.578     |
| SO <sub>3</sub>                | 4.653     |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3.835     |
| MgO                            | 1.415     |
| K <sub>2</sub> O               | 0.719     |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.625     |
| Cl                             | 0.430     |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.359     |
| Sr                             | 0.249     |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.179     |
| MnO                            | 0.051     |
| Zn                             | 0.019     |
| Rb                             | 0.008     |

Fuente: Elaboración Propia

## 2.5 CENIZA VOLANTE

La identificación de las características físicas y químicas de la ceniza volante que se emplea en esta investigación se realizó mediante difracción de rayos X (DRX), haciendo uso de los laboratorios de la Universidad Nacional de Colombia, los resultados obtenidos se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 21 Caracterización de Ceniza Volante

|  |          |
|--|----------|
| <b>Contenido de humedad</b>                                  | 1.50%    |
| <b>Pérdida al fuego</b>                                      | 10.18%   |
| <b>Oxidos (% Masa)</b>                                       |          |
| <b>SiO<sub>2</sub></b>                                       | 62.209 % |
| <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>                           | 23.860 % |
| <b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>                           | 5.609 %  |
| <b>CaO</b>   | 1.009 %  |
| <b>MgO</b>   | 0.643 %  |
| <b>SO<sub>3</sub></b>  | 1.091 %  |
| <b>Na<sub>2</sub>O</b>                                       | 0.564 %  |
| <b>K<sub>2</sub>O</b>  | 1.905 %  |
| <b>Densidad</b>  | 2.073    |
| <b>Area Específica Superficial</b><br><b>m<sup>2</sup>/g</b> | 0.703    |
| <b>Clasificación</b>   | Clase F  |

Fuente: Elaboración Propia

De la tabla 18, se identifica que la característica de pérdida de fuego registra un valor muy elevado del 10,18% lo cual indica presencia de inquemados y restándole calidad y pureza a la ceniza volante usada como material cementante suplementario; este procedimiento se realiza mediante una mufla a 900 °C por 24 horas.

## 2.6 ELABORACIÓN DE MUESTRAS DE MORTERO

Se realiza la elaboración de la mezcla de diseño de cilindros y cubos de mortero con base en la norma NTC-220.

### Procedimiento

Los materiales utilizados para el diseño de las muestras de mortero son, cemento ARGOS tipo UG y arena silícea gradada estandarizada seca.

Según la norma nos indica para la fabricación de un mortero se debe implementar una parte de cemento por 2,75 partes de arena utilizando la relación de agua/cemento de 0,43; con la condición de que la fluidez de este material se encuentre en un valor de  $110 \pm 5$  de acuerdo en la NTC-111 (ASTM C-230). Esta cantidad de materiales para el mezclado es para obtener un total entre 6 a 9 cubos para el ensayo.

Se fabricaron 3 cilindro de 4" de diámetro y 3 cubos de mortero de lados iguales de 5 cm con un área transversal de  $25 \text{ cm}^2$ , en los cuales, por cada mezcla diseñada se varia gradualmente el porcentaje de adición de ceniza volante (Fly Ash FA).



*Figura 13 Mezcla de Mortero*



Fuente: Elaboración propia

*Figura 12 Elaboración de Cubos de Mortero*



Fuente: Elaboración propia

*Figura 14 Elaboración de Cilindros de Mortero*



Fuente: Elaboración Propia

Para determinar la fluidez de la mezcla de concreto, se coloca una capa de 25 mm de espesor y se compacta 20 veces hasta terminar el llenado del molde, este procedimiento se debe realizar en la mesa de fluidez, retirando el molde y utilizando el calibrador se toma tres mediciones del diámetro del mortero.

*Figura 15 Ensayo de Fluidez Mezcla de Mortero*



Fuente: Elaboración Propia

A continuación, se muestra la tabla con las cantidades usadas para la elaboración de las muestras de mortero.

*Tabla 22 Volumetría Muestras de Mortero*

| Material | Peso (Kg) | Densidad (g/cm <sup>3</sup> ) | Volumen (cm <sup>3</sup> ) | Peso total (Kg) | Peso total corregido (Kg) | Vol. Total (cm <sup>3</sup> ) |
|----------|-----------|-------------------------------|----------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------------------|
| Cemento  | 1         | 2.95                          | 0.339                      | 2.398           | 2.878                     | 0.976                         |
| Agua     | 0.43      | 1                             | 0.430                      | 1.031           | 1.238                     | 1.238                         |
| Arena    | 2.75      | 2.4                           | 1.146                      | 6.596           | 7.915                     | 3.298                         |
| Aire     | -         | -                             | 0.050                      | -               | -                         | 0.120                         |
| Total    | -         | -                             | 1.965                      | -               | -                         | 5.631                         |

Fuente: Elaboración Propia

Para saber la cantidad de porcentaje de la ceniza volante usado en cada una de las muestras del 0%,10%,20% y 30% se determinó de la siguiente manera

$$\text{Cantidad Ceniza Volante } 10\% = 2,89Kg - [(2,89 Kg)(0.1)] = 2,60Kg$$

Este procedimiento se realiza para cada uno de los porcentajes de variación de la ceniza volante, a continuación, se muestran todos los resultados.

*Tabla 23 Porcentajes de Variación Ceniza Volante*

| Para Mezcla 1 - Reemplazo del 0% |               |
|----------------------------------|---------------|
| Material                         | Cantidad (Kg) |
| Cemento                          | 2,89          |
| Agua                             | 1,32          |
| Arena                            | 7,94          |
| FA                               | 0,00          |

| Para Mezcla 2 - Reemplazo del 10% |               |
|-----------------------------------|---------------|
| Material                          | Cantidad (Kg) |
| Cemento                           | 2,60          |
| Agua                              | 1,32          |
| Arena                             | 7,94          |
| FA                                | 0,29          |

| Para Mezcla 3 - Reemplazo del 20% |               |
|-----------------------------------|---------------|
| Material                          | Cantidad (Kg) |
| Cemento                           | 2,31          |
| Agua                              | 1,32          |
| Arena                             | 7,94          |
| FA                                | 0,58          |

| Para Mezcla 4 - Reemplazo del 30% |               |
|-----------------------------------|---------------|
| Material                          | Cantidad (Kg) |
| Cemento                           | 2,02          |
| Agua                              | 1,32          |
| Arena                             | 7,94          |
| FA                                | 0,87          |

Fuente: Elaboración Propia

### 3 CARACTERIZACION DE MUESTRAS DE MORTERO

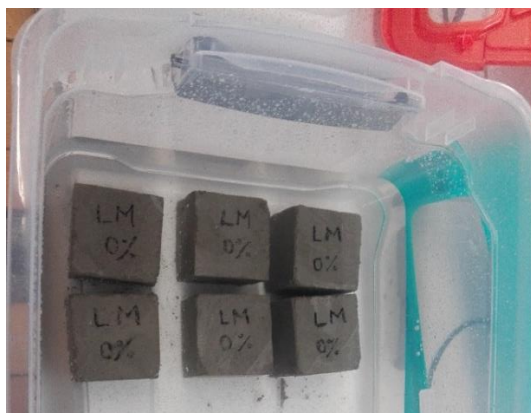
#### 3.1 RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y MÓDULO DE ELASTICIDAD EN CUBOS DE MORTERO

De acuerdo con la norma NTC-220 se realiza el ensayo de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad (E), colocando las muestras elaboradas (cubos de mortero) en la maquina universal; obteniendo así, los valores de esfuerzo, deformación y módulo de elasticidad a los 7, 14 y 28 días de curado, realizando así los pertinentes cálculos para el análisis.

##### Procedimiento

1. Sacar uno a uno los cubos de la piscina de agua a los 7, 14 y 28 días de curado y secarlos adecuadamente verificando que no queden residuos de arena.

*Figura 16 Curado cubos de Mortero*



Fuente: Elaboración propia

2. Posterior al secado, comprobar que los cubos posean caras totalmente planas y a colocarlos rápidamente en la maquina universal evitando que el cubo tenga la menor perdida de humedad posible

*Figura 17 Cubos de mortero*



Fuente: Elaboración propia

3. Colocar el cubo en la maquina universal, verificando que las caras que quedaron en contacto con el molde sean aquellas sobre las que se va a aplicar la carga.

*Figura 18 Cubo en Maquina Universal - Ensayo resistencia a la compresión.*



Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presentan los resultados obtenidos con la adición de 0% de ceniza volante.

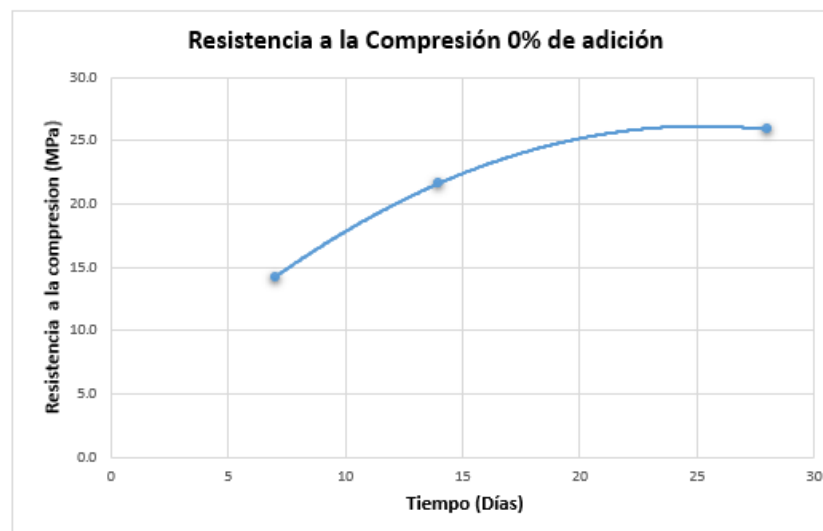
*Tabla 24 Resultados de Compresión para 0% de ceniza volante*

| <b>Muestras</b> | <b>Resistencia a la compresión (Mpa) a los 7 días</b> | <b>Resistencia a la compresión (Mpa) a los 14 días</b> | <b>Resistencia a la compresión (Mpa) a los 28 días</b> |
|-----------------|---|--|--|
| <b>1</b>        | 13.95   | 22.13  | 23.45  |
| <b>2</b>        | 14.93   | 21.36  | 26.22  |
| <b>3</b>        | 13.77   | 21.40  | 27.99  |
| <b>Media</b>    | <b>14.22</b>  | <b>21.63</b>   | <b>25.89</b>   |

Fuente: Elaboración Propia

La grafica 3 representa gráficamente la resistencia a compresión a los 7, 14 y 28 días; observando que de las probetas de mortero con una cantidad de adición de 0% de ceniza volante aumenta su resistencia y logrando su máxima capacidad a los 28 días. Ver tabla 21

*Gráfica 3 Resistencia a la Compresión a los 7 ,14 y 28 días con 0% de ceniza volante*



Fuente: Elaboración Propia

## Resistencia a la compresión con 10% ceniza volante

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos con la adición del 10% de ceniza volante a las probetas de mortero.

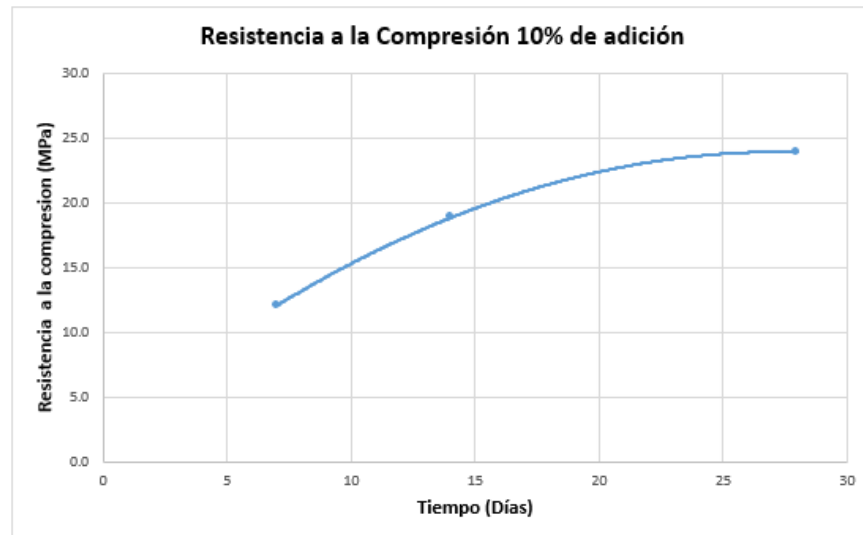
*Tabla 25 Resultados de Compresión para 10% de ceniza volante*

| Muestras | Resistencia a la compresión (Mpa) a los 7 días | Resistencia a la compresión (Mpa) a los 14 días | Resistencia a la compresión (Mpa) a los 28 días |
|----------|--|---|---|
| 1        | 11.90  | 18.02   | 26.22   |
| 2        | 12.03  | 19.14   | 22.06   |
| 3        | 12.13  | 19.24   | 23.41   |
| Media    | 12.02  | 18.80   | 23.90   |

Fuente: Elaboración Propia

La grafica 4 representa el comportamiento de la resistencia a compresión a los 7, 14 y 28 días; observando las probetas de mortero con una cantidad del 10% de adición de la ceniza volante se determina que ha disminuido su resistencia con respecto a las probetas que no se le adicionaron ceniza volante. Ver tabla 21 y 22.

*Gráfica 4 Resistencia a la Compresión a los 7, 14 y 28 días con 10% de ceniza volante*



Fuente: Elaboración Propia

## Resistencia a la compresión con 20% ceniza volante

Los resultados obtenidos con la adición del 20% de ceniza volante a las probetas de mortero se presentan en la siguiente tabla.

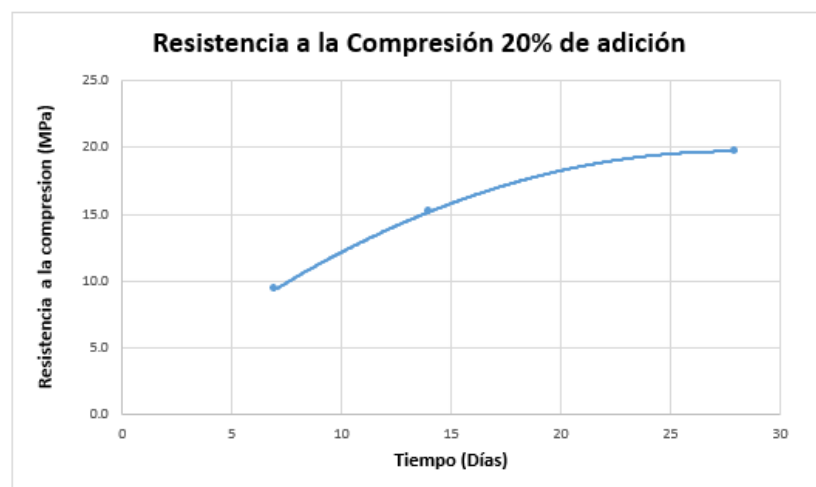
*Tabla 26 Resultados de Compresión para 20% de ceniza volante*

| Muestras | Resistencia a la compresión (Mpa) a los 7 días | Resistencia a la compresión (Mpa) a los 14 días | Resistencia a la compresión (Mpa) a los 28 días |
|----------|--|---|---|
| 1        | 9.35   | 15.30   | 18.82   |
| 2        | 9.87   | 14.52   | 20.46   |
| 3        | 8.97   | 15.67   | 19.79   |
| Media    | 9.40   | 15.16   | 19.69   |

Fuente: Elaboración Propia

La grafica 5 representa el comportamiento de la resistencia a compresión transcurrido el tiempo de 7, 14 y 28 días; observando las probetas de mortero que poseen una cantidad de adición del 20% de ceniza volante se identifica que sigue disminuyendo su resistencia en comparación con las resistencias a compresión del 0% y 10% de contenido de ceniza volante.

*Gráfica 5 Resistencia a la Compresión a los 7, 14 y 28 días con 20% de ceniza volante*



Fuente: Elaboración Propia



## Resistencia a la compresión con 30% ceniza volante

En la siguiente tabla se presentan los resultados obtenidos con la adición del 30% de ceniza volante a las probetas de mortero.

*Tabla 27 Resultados de Compresión para 30% de ceniza volante*

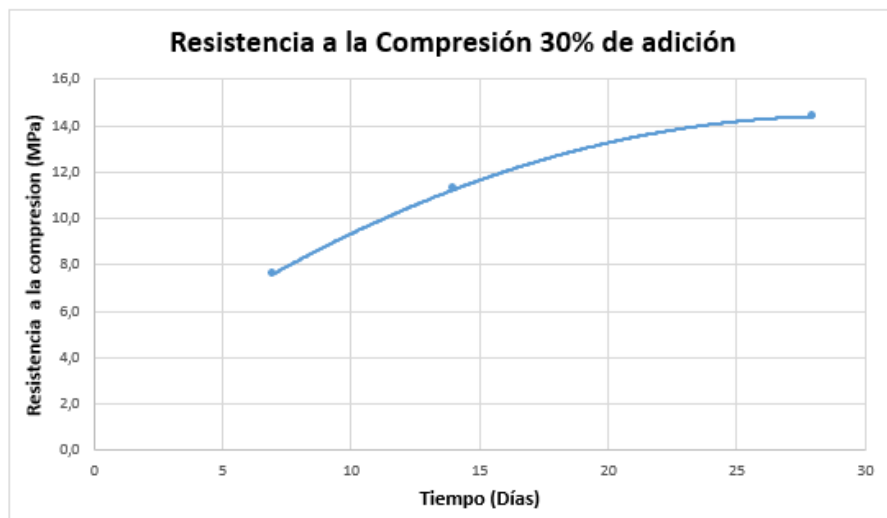
| <b>Muestras</b> | <b>Resistencia a la compresión (Mpa) a los 7 días</b> | <b>Resistencia a la compresión (Mpa) a los 14 días</b> | <b>Resistencia a la compresión (Mpa) a los 28 días</b> |
|-----------------|---|--|--|
| <b>1</b>        | 7.65  | 11.54  | 14.59  |
| <b>2</b>        | 7.35  | 11.03  | 14.99  |
| <b>3</b>        | 7.86  | 11.16  | 13.61  |
| <b>Media</b>    | <b>7.62</b>   | <b>11.24</b>   | <b>14.40</b>   |

Fuente: Elaboración Propia

La grafica 6 representa el comportamiento de la resistencia a compresión transcurrido el tiempo de 7, 14 y 28 días; observando las probetas de mortero que contienen el 30% de ceniza volante se identifica que su resistencia bajo significativamente si se compara con los demás resultados. Ver tablas 21,22 y 23

Una de las posibilidades de este decaimiento es debido al porcentaje de perdida de fuego que tiene la ceniza volante ya que esto lleva al mineral poseer una cantidad considerable de inquemados.

Gráfica 6 Resistencia a la Compresión a los 7, 14 y 28 días con el 30% de ceniza Volante



Fuente: Elaboración Propia

## Cálculos de Resistencia a la compresión y Módulo de elasticidad

Datos suministrados por la maquina universal

- Desplazamiento: 0.0919 mm
- Carga: 7.9080 KN
- Tiempo: 5.08 s

De acuerdo con los datos obtenidos en el laboratorio se procede a calcular la deformación unitaria, Modulo de Elasticidad y Esfuerzo del concreto.

- Deformación unitaria:  $\frac{Desplazamiento}{Área} = \frac{0.0919mm}{500mm} = 0.0002$
- Esfuerzo:  $\frac{Carga}{Área} = \frac{7.9080KN}{2.5mm^2} = 3.1632MPa$

Para realizar el cálculo del esfuerzo máximo y el módulo de elasticidad se toman los valores obtenidos mediante Excel de acuerdo con el anexo 2 (Resistencia a la compresión. Ensayo 0% Muestra #1).

- Esfuerzo máximo del concreto: 23.453MPa

Para realizar el cálculo de módulo de elasticidad, se realiza de acuerdo con el 40% del Esfuerzo máximo del concreto.

$$40\% = 23.453 * 0.40 = 9.38MPa$$

Aproximando este valor al siguiente dato obtenido para el 40% del Esfuerzo Máximo.

Esfuerzo de concreto = 10.10 MPa y Deformación unitaria=0.0005

Esfuerzo de concreto inicial =1.5441 y Deformación unitaria inicial=0.0001

- $$\text{Módulo de Elasticidad al 40\%} = \frac{\text{Esfuerzo al 40\%} - \text{Esfuerzo Inicial}}{\text{Deformación al 40\%} - \text{Deformación inicial}}$$

$$= \frac{10.10 \text{ Mpa} - 1.5441 \text{ Mpa}}{0.0005 - 0.0001} = 21.908.548 \text{ MPa}$$

Este procedimiento se realiza para para cada uno de los datos obtenidos en el laboratorio de cada una de las muestras diseñadas con diferente contenido de adición de ceniza volante.

## Gráficas

A continuación, se evidencia las gráficas y las tablas de módulo de elasticidad y el esfuerzo del concreto de cada una de las muestras diseñadas con diferente porcentaje de ceniza volante.

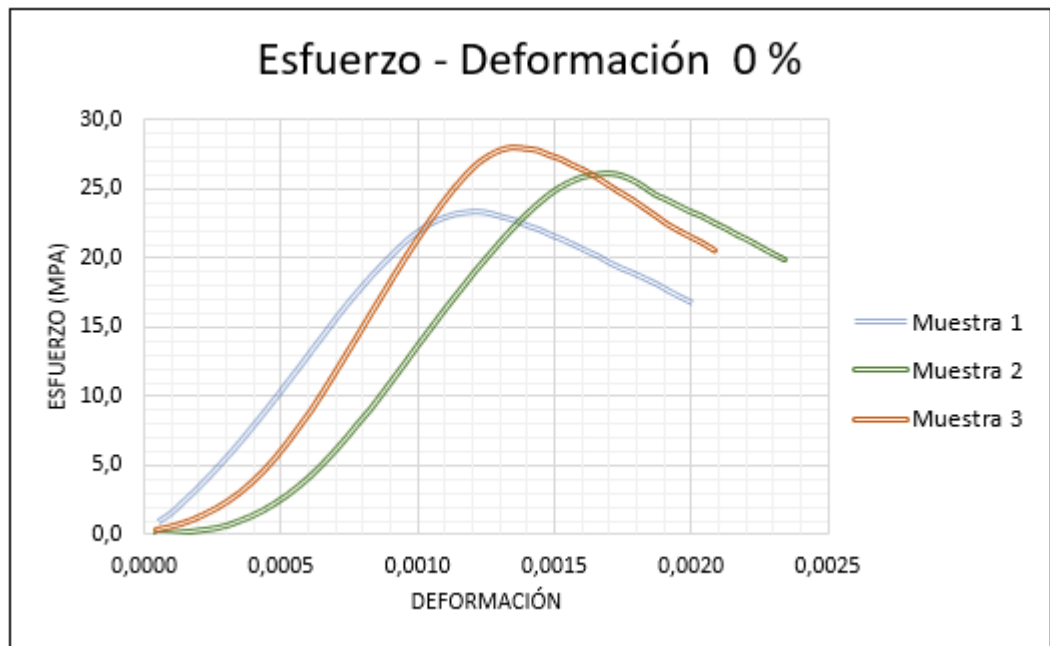
- Muestra 0%**

*Tabla 28 Modulo de elasticidad y Esfuerzo del concreto para la muestra del 0%*

| Muestra 0% |                             |                               |
|------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Número     | Módulo de Elasticidad E Mpa | Esfuerzo del Concreto f'c Mpa |
| 1          | 21908,5                     | 23,5                          |
| 2          | 23412,8                     | 26,2                          |
| 3          | 26161,3                     | 28,0                          |

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 7 Esfuerzo – Deformación 0%



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 7 se puede evidenciar que la muestra 3 posee una mayor resistencia a la compresión con un esfuerzo de 28 MPa referente a las demás muestras, con un módulo de elasticidad de 26161.3 MPa, siendo esta la que mayor capacidad de resistencia de resistencia posee.

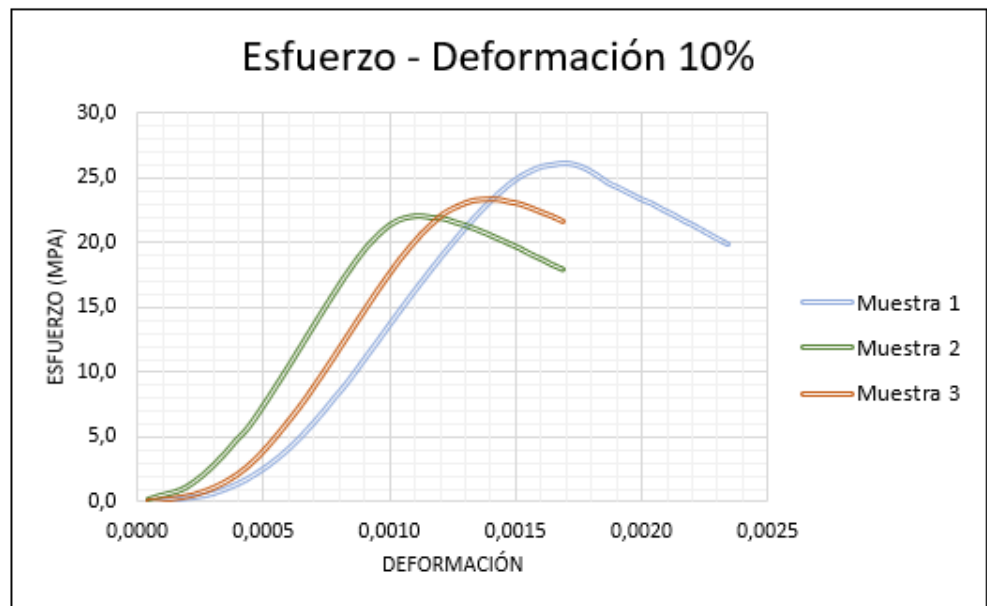
- **Muestra de 10%**

*Tabla 29 Modulo de elasticidad y Esfuerzo del concreto para la muestra del 10%*

| Muestra 10% |                             |                               |
|-------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Número      | Módulo de Elasticidad E MPa | Esfuerzo del Concreto f'c MPa |
| 1           | 23412,8                     | 26,2                          |
| 2           | 26667,6                     | 22,1                          |
| 3           | 25749,0                     | 23,4                          |

Fuente: Elaboración propia

*Gráfica 8 Esfuerzo – Deformación 10%*



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 8 se puede evidenciar que la muestra con mayor resistencia a la compresión es la 1, con un esfuerzo de 26.2 MPa y un módulo de elasticidad de 23412.8 MPa. La deformación tiene un comportamiento directamente proporcional al esfuerzo solo en su zona elástica; por lo tanto, esta muestra

presenta una deformación mayor con relación a las otras muestras, haciendo que soporte un mayor esfuerzo de compresión.

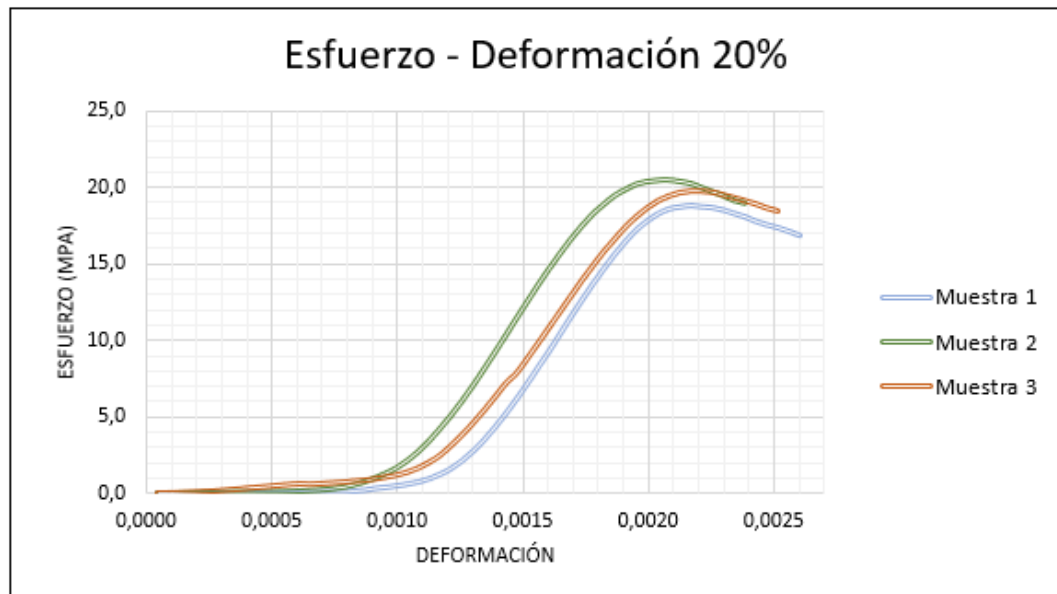
- **Muestra de 20%**

*Tabla 30 Modulo de elasticidad y Esfuerzo del concreto para la muestra del 20%*

| Muestra 20% |                             |                               |
|-------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Número      | Módulo de Elasticidad E MPa | Esfuerzo del Concreto f'c MPa |
| 1           | 22163,3                     | 18,8                          |
| 2           | 22990,4                     | 20,5                          |
| 3           | 19712,7                     | 19,8                          |

Fuente: Elaboración propia

*Gráfica 9 Esfuerzo – Deformación 20%*



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 9 se puede evidenciar que la muestra 2 posee una mayor resistencia a la compresión con un esfuerzo de 20.5 MPa y un módulo de elasticidad de 2290.4 MPa, siendo esta la que mayor capacidad de resistencia de resistencia posee. Se presenta una relación directamente proporcional en la deformación y el esfuerzo únicamente en la zona elástica, puesto en el punto de rotura los valores de esfuerzo decaen.

- **Muestra de 30%**

*Tabla 31 Módulo de elasticidad y Esfuerzo del concreto para la muestra del 30%*

| Muestra 30% |                             |                               |
|-------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Número      | Módulo de Elasticidad E MPa | Esfuerzo del Concreto f'c MPa |
| 1           | 23134,6                     | 14,6                          |
| 2           | 16641,7                     | 15,0                          |
| 3           | 20111,4                     | 13,6                          |

Fuente: Elaboración propia

*Gráfica 10 Esfuerzo – Deformación 20%*



Fuente: Elaboración propia



En la gráfica 10 se observa un comportamiento similar entre las 3 muestras de mortero, siendo la muestra 2 la que soporta una mayor resistencia a la compresión con relación a las otras muestras ya que presenta un esfuerzo de 15 MPa y un módulo de elasticidad 16641.7 MPa. La relación esfuerzo vs deformación presenta un comportamiento directamente proporcional en la zona elástica.

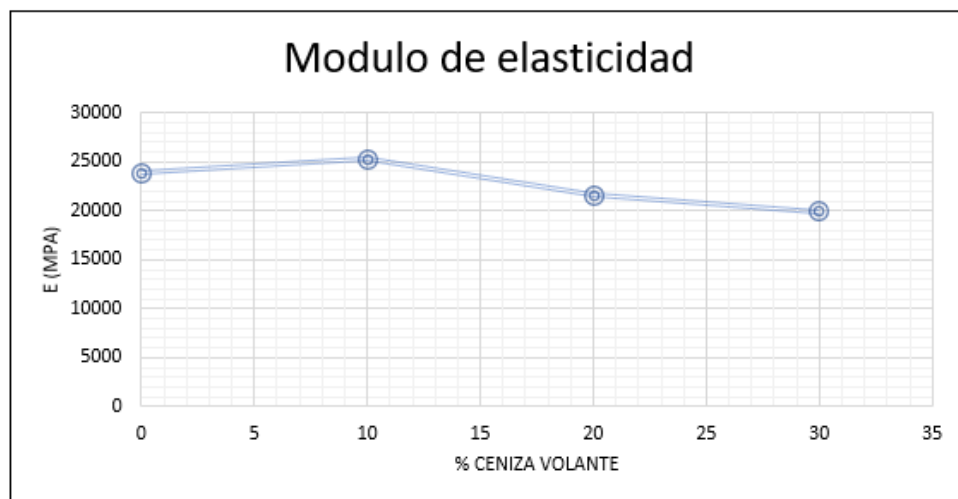
### Resistencia a la compresión y módulo de elasticidad con diferente porcentaje de ceniza volante.

Tabla 32 Resistencia a la Compresión y Módulo de Elasticidad

| %  | Esfuerzo MPa | E MPa     |
|----|--------------|-----------|
| 0  | 25,889       | 23827,574 |
| 10 | 23,895       | 25276,478 |
| 20 | 19,691       | 21622,133 |
| 30 | 14,395       | 19962,578 |

Fuentes: Elaboración propia

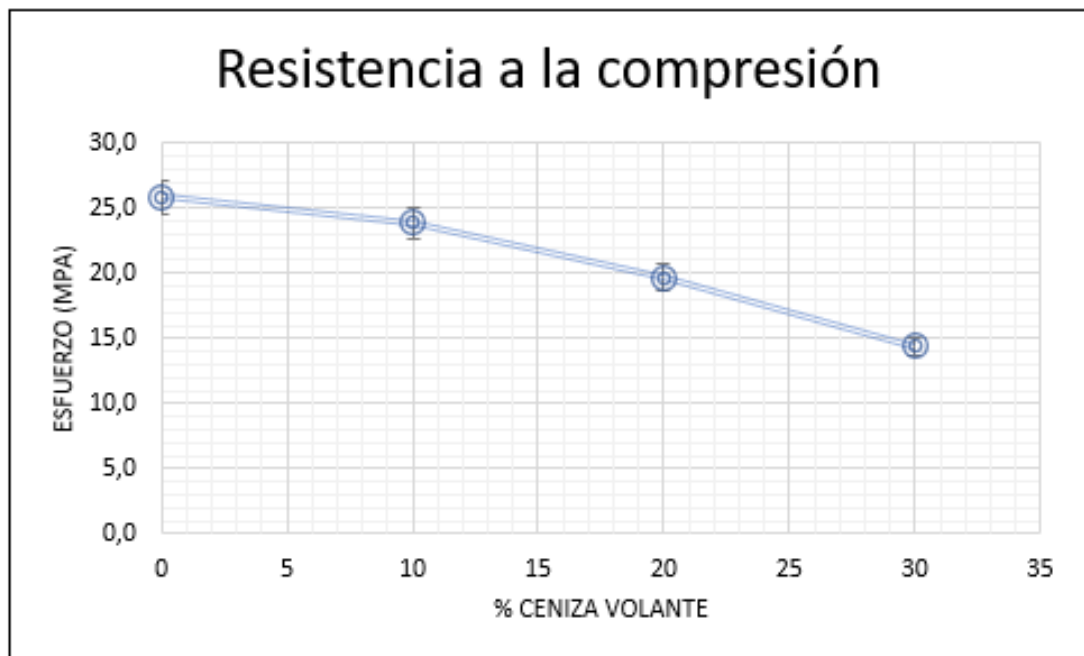
Gráfica 11 Módulo de Elasticidad



Fuentes: Elaboración propia

La adición de ceniza volante de TERMOPAIPA genera una reducción en el módulo de elasticidad del 16.22%. Ver gráfica 11. Esto es generado por el porcentaje de inquemados presentes en este mineral, lo cual la hace poco eficiente para ser usada en grandes porcentajes como adición al mortero.

Gráfica 12 Resistencia a la compresión



Fuentes: Elaboración propia

En la gráfica 12 se puede observar que la resistencia a la compresión disminuye considerablemente al momento de adicionar la ceniza volante; demostrando que en una muestra de mortero convencional se presenta mayor resistencia a los esfuerzos que fueron sometidas las muestras.

### 3.2 DENSIDAD Y POROSIDAD

De acuerdo con la norma ASTM C642 – 13 se realiza el ensayo de densidad y porosidad, realizando la toma de datos de los pesos pertinentes para cada una de las muestras de mortero cilíndricas de un diámetro de 4" y un espesor de 5 cm, determinando el porcentaje de porosidad de cada una de ellas y la densidad aparente y volumétrica.

#### Procedimiento

1. Después de que la muestra se encuentra completamente saturada, retirarla de la piscina de agua e inmediatamente se procede a pesar cada una de ellas, evitando la menor pérdida de humedad posible.

*Figura 19. Peso Muestras saturadas*



Fuente: Elaboración propia

2. Posterior a este proceso, se sumerge la muestra en una canasta suspendida en agua y se toman los datos de los pesos.

*Figura 20. Peso muestra sumergida*



Fuente: Elaboración propia

3. Finalmente, se lleva la muestra a la hora a una temperatura de 60°C y después de 24 horas se procede a realizar los pesos correspondientes a la muestra seca.

*Figura 21 Peso muestra seca*



Fuente: Elaboración propia

En la tabla 26 se presentan los datos tomados en el laboratorio de la muestra saturada, sumergida y seca correspondiente a cada muestra de mortero.

*Tabla 33 Datos Ensayo Densidad y Porosidad*

| <b>Peso Saturado SSS (g)</b> |           |            |            |            |
|------------------------------|-----------|------------|------------|------------|
| <b>Muestra</b>               | <b>0%</b> | <b>10%</b> | <b>20%</b> | <b>30%</b> |
| 1                            | 325,5     | 909,8      | 859,2      | 883,5      |
| 2                            | 363,2     | 884,7      | 894,8      | 867,5      |
| 3                            | -----     | 897,1      | 861,4      | 879        |
| 4                            | 893,5     | 880,5      | 888        | 852        |
| <b>Peso Sumergido (g)</b>    |           |            |            |            |
| <b>Muestra</b>               | <b>0%</b> | <b>10%</b> | <b>20%</b> | <b>30%</b> |
| 1                            | 179,6     | 493,9      | 456,8      | 470,5      |
| 2                            | 199,3     | 475,6      | 480,7      | 460        |
| 3                            | -----     | 483        | 463,1      | 468,5      |
| 4                            | 482       | 470,5      | 471        | 444        |
| <b>Peso Seco (g)</b>         |           |            |            |            |
| <b>Muestra</b>               | <b>0%</b> | <b>10%</b> | <b>20%</b> | <b>30%</b> |
| 1                            | 300,7     | 862        | 801,5      | 829,6      |
| 2                            | 333,1     | 834,4      | 846,3      | 817,2      |
| 3                            | -----     | 848        | 812,1      | 829,7      |
| 4                            | 829       | 818,6      | 828,4      | 789,6      |

Fuente: Elaboración propia

### 3.2.1 Porosidad y vacíos

#### Cálculos

Datos obtenidos en el laboratorio Para la muestra N° 2 con el 20% de adición de ceniza volante.

Peso Saturado: 984.8 g

Peso Sumergido: 480.7 g

Peso Seco: 846.3 g

Con estos datos, se procede a calcular el porcentaje de porosidad, la densidad aparente y volumétrica de la muestra de mortero.

- Porcentaje de porosidad o vacíos =  $\frac{\text{Peso Saturado} - \text{Peso Seco}}{\text{Peso Saturado} - \text{Peso Sumergido}} * 100$

$$= \frac{984.8g - 846.3g}{984.8g - 480.7} * 100 = 11.71\%$$

A continuación, se presenta la tabla 27, en la cual se evidencia la porosidad o porcentaje de vacíos para cada una de las muestras de mortero.

Tabla 34 Porosidad - Vacíos

| POROSIDAD - VACIOS % |        |        |        |        |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|
| Muestra              | 0%     | 10%    | 20%    | 30%    |
| 1                    | 16,998 | 11,493 | 14,339 | 13,051 |
| 2                    | 18,365 | 12,295 | 11,712 | 12,344 |
| 3                    | -----  | 11,857 | 12,378 | 12,010 |
| 4                    | 15,674 | 15,098 | 14,293 | 15,294 |

Fuente: Elaboración propia

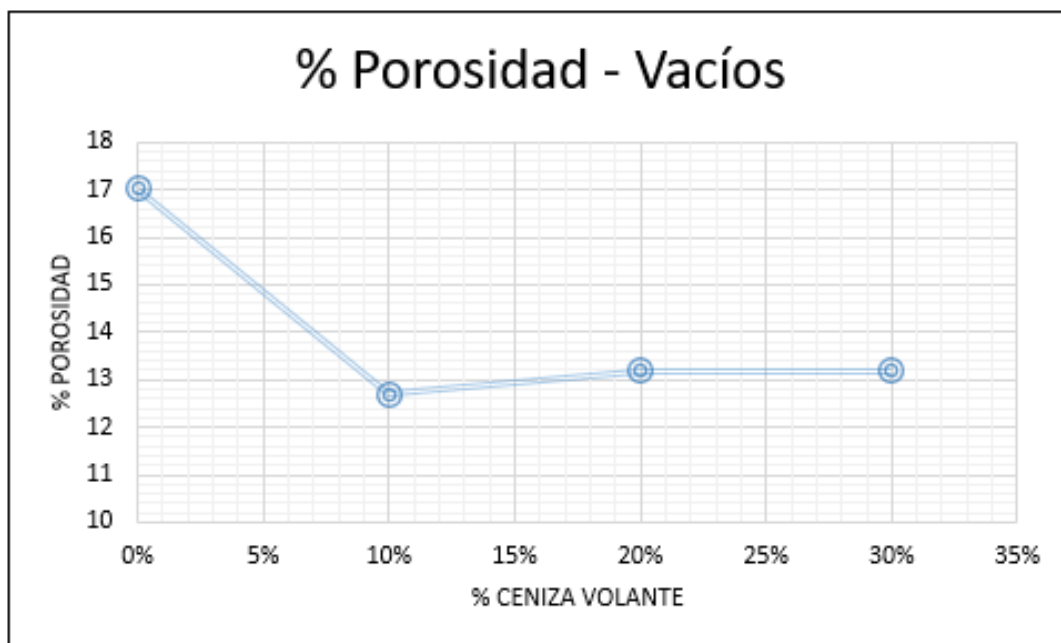
Para la elaboración de la gráfica ceniza Vs porosidad se realiza un promedio de los resultados obtenido de cada una de las muestras. Ver tabla 28.

Tabla 35 Promedio porosidad y Vacíos

| POROSIDAD - VACIOS % |        |        |        |        |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|
| Muestra              | 0%     | 10%    | 20%    | 30%    |
|                      | 17,012 | 12,686 | 13,180 | 13,175 |

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 13 Porosidad y Vacíos



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 13 se puede observar que el porcentaje de poros aumenta a medida que se adiciona la ceniza volante a las muestras de mortero, haciendo que disminuyan sus propiedades mecánicas y por lo tanto la cantidad de fluidos que ingresen sean más alto.

### 3.2.2 Densidad Aparente

Para el cálculo de la densidad aparente se tiene una temperatura del agua de 20° y una densidad  $99.829\text{g}/\text{cm}^3$

$$\checkmark \text{ Densidad Aparente} = \frac{\text{Peso seco}}{\text{Peso Seco} - \text{Peso Sumergido}} * \gamma_{\text{agua}}$$

$$= \frac{846.3g}{846.3g - 480.7g} * 99.829 = 231.087 gr/cm^3$$

A continuación, se presenta la tabla 29, en la cual se observa la densidad aparente para cada una de las muestras de mortero.

Tabla 36. Densidad Aparente

| Densidad Aparente gr/cm3 |         |         |         |         |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Muestra                  | 0%      | 10%     | 20%     | 30%     |
| 1                        | 247,883 | 233,775 | 232,123 | 230,627 |
| 2                        | 248,528 | 232,155 | 231,087 | 228,388 |
| 3                        | -----   | 231,931 | 232,296 | 229,314 |
| 4                        | 238,496 | 234,760 | 231,389 | 228,082 |

Fuente: Elaboración propia

Para la elaboración de la gráfica Densidad Vs ceniza volante se realiza un promedio de los resultados obtenidos de cada una de las muestras. Ver tabla 30.

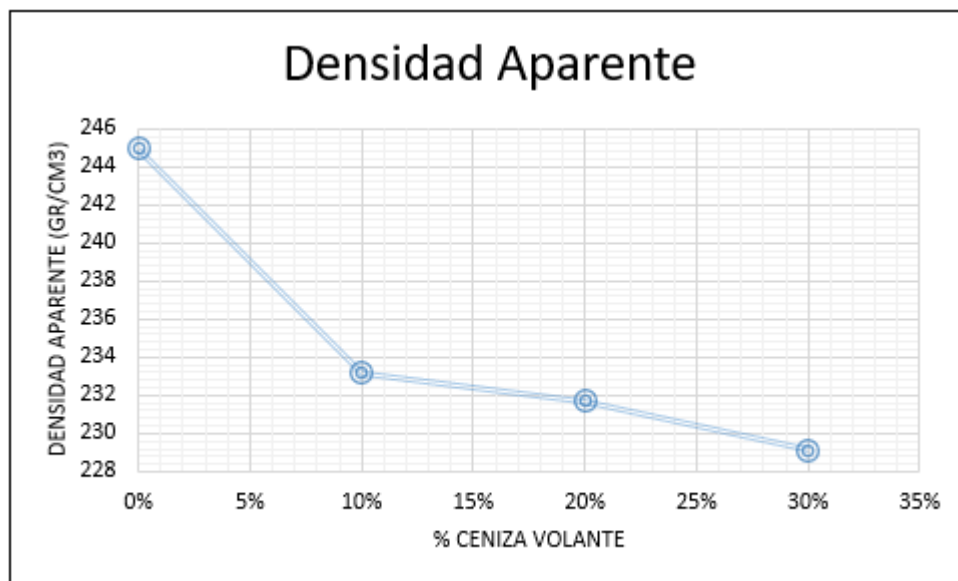
Tabla 37 Promedio Densidad Aparente

| Densidad Aparente gr/cm3 |         |         |         |         |
|--------------------------|---------|---------|---------|---------|
| Muestra                  | 0%      | 10%     | 20%     | 30%     |
|                          | 244,969 | 233,156 | 231,724 | 229,103 |

Fuente: Elaboración propia



Gráfica 14 Densidad Aparente



Fuente: Elaboración propia

La densidad aparente y el porcentaje de la ceniza volate tiene un comportamiento indirectamente proporcional; debido a que en el mortero convencional la Densidad tiene una cantidad elevada con relación a las muestras con contenido de este mineral; ya que la ceniza permite que ingrese un mayor contenido de agua en la muestra. Ver gráfica 14.

### 3.2.3 Densidad Volumétrica

Para el cálculo de la densidad volumétrica se tiene una temperatura del agua de 20° y una densidad  $99.829g/cm^3$

- $$\text{Densidad Volumétrica} = \frac{\text{Peso Saturado}}{\text{Peso Saturado} - \text{Peso Sumergido}} * \gamma_{\text{agua}}$$

$$= \frac{984.8}{948.8g - 480.7g} * 99.829 = 215.714 \text{ gr/cm}^3$$

De igual manera, se procede a realizar los cálculos para todas las muestras elaboradas.

A continuación, se presenta la tabla 31, en la cual se observa la densidad aparente para cada una de las muestras de mortero.

Tabla 38. Densidad Volumétrica

| Densidad Volumétrica gr/cm <sup>3</sup> |         |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|---------|
| Muestra                                 | 0%      | 10%     | 20%     | 30%     |
| 1                                       | 222,717 | 218,380 | 213,154 | 213,557 |
| 2                                       | 221,220 | 215,885 | 215,714 | 212,519 |
| 3                                       | -----   | 216,268 | 215,899 | 213,763 |
| 4                                       | 216,761 | 214,389 | 212,585 | 208,466 |

Fuente: Elaboración propia

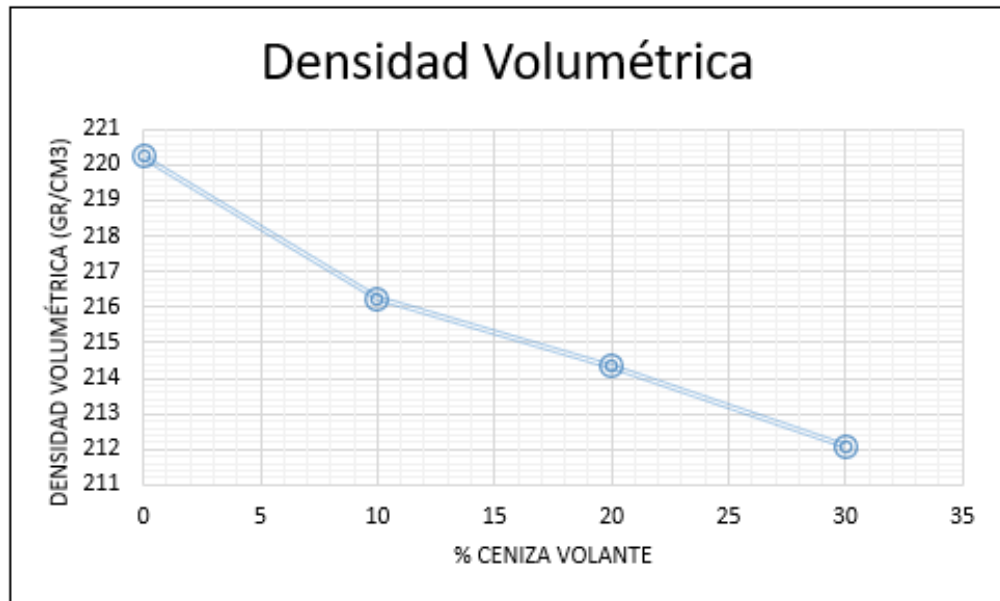
Para la elaboración de la gráfica Densidad Vs ceniza volante se realiza un promedio de los resultados obtenidos de cada una de las muestras. Ver tabla 32.

Tabla 39 Promedio Densidad Volumétrica

| Densidad Volumétrica gr/cm <sup>3</sup> |         |         |         |         |
|---|---------|---------|---------|---------|
| Muestra                                 | 0%      | 10%     | 20%     | 30%     |
|   | 220,232 | 216,231 | 214,338 | 212,076 |

Fuente: Elaboración propia

Gráfica 15 Densidad Volumétrica



Fuente: Elaboración propia

Con base en la gráfica 15 se evidencia que la relación entre la densidad volumétrica y el porcentaje de la ceniza volante describe un comportamiento lineal descendente con una gran diferencia de aproximadamente 10 g/cm<sup>3</sup> que influye en las propiedades mecánicas del concreto debido a que aumenta su porosidad llegando a generar disminución en la resistencia.

### 3.3 NT BUILD-492

Con base en la norma Nordtest NT Build 492, se ejecutó este ensayo que determina el coeficiente de difusión en concretos y morteros en estados no estacionarios.

### Procedimiento:

El ensayo consta de unas probetas cilíndricas de mortero de un diámetro de 100 mm y un espesor de 50mm, estas muestras se obtuvieron del corte de las probetas de 100 mm de diámetro y una altura de 200mm que se aplica un potencial eléctrico de 30V axialmente que cumple la función de estimular la penetración del ion en las probetas durante 24 horas. Para el ensayo se tomaron tres probetas de mortero por cada porcentaje de variación de ceniza volante.

Para la determinación del coeficiente de difusión se basa en la siguiente formula:

$$D_{\text{nssm}} = \frac{0.0239(273 + T)L}{(U - 2)t} \left( x_d - 0.0238 \sqrt{\frac{(273 + T)L x_d}{U - 2}} \right)$$

$D_{\text{nssm}}$ : non-steady-state migration coefficient,  $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ;

$U$ : absolute value of the applied voltage, V;

$T$ : average value of the initial and final temperatures in the anolyte solution, °C;

$L$ : thickness of the specimen, mm;

$x_d$ : average value of the penetration depths, mm;

$t$ : test duration, hour.

*Figura 22 Ensayo NT Build 492*



Fuente: Elaboración propia

*Figura 23 Ensayo NT Build 492*



Fuente: Elaboración propia

## Datos obtenidos en laboratorio:

- Para 0% de contenido de ceniza volante

### Muestra No 1 – 0%FA

Tabla 40 Muestra 1 - 0% FA

| Muestra | 0% FA |    |
|---------|-------|----|
| T       | 21    | °C |
| L       | 50    | mm |
| U       | 30    | V  |
| t       | 24    | hr |
| xd      | 32.65 | mm |

Fuente: Elaboración Propia

### Muestra No 2 – 0%FA

Tabla 41 Muestra 2 - 0% FA

| Muestra | 0% FA |    |
|---------|-------|----|
| T       | 21    | °C |
| L       | 51    | mm |
| U       | 30    | V  |
| t       | 24    | hr |
| xd      | 31.95 | mm |

Fuente: Elaboración Propia

### Muestra No 3 – 0%FA

Tabla 42 Muestra 3 - 0% FA

| Muestra | 0% FA |    |
|---------|-------|----|
| T       | 21    | °C |
| L       | 50    | mm |
| U       | 30    | V  |
| t       | 24    | hr |
| xd      | 32.9  | mm |

Fuente: Elaboración Propia

- Para 10% de contenido de ceniza volante

#### Muestra No 1 – 10%FA

*Tabla 43 Muestra 1 - 10% FA*

| <b>Muestra</b> | <b>10 % FA</b> |    |
|----------------|----------------|----|
| <b>T</b>       | 21             | °C |
| <b>L</b>       | 51             | mm |
| <b>U</b>       | 30             | V  |
| <b>t</b>       | 24             | hr |
| <b>xd</b>      | 34.15          | mm |

Fuente: Elaboración Propia

#### Muestra No 2 – 10%FA

*Tabla 44 Muestra 2 - 10%*

| <b>Muestra</b> | <b>10 % FA</b> |    |
|----------------|----------------|----|
| <b>T</b>       | 21             | °C |
| <b>L</b>       | 50             | mm |
| <b>U</b>       | 30             | V  |
| <b>t</b>       | 24             | hr |
| <b>xd</b>      | 36.10          | mm |

Fuente: Elaboración Propia

#### Muestra No 3 – 10%FA

*Tabla 45 Muestra 3 - 10% FA*

| <b>Muestra</b> | <b>10 % FA</b> |    |
|----------------|----------------|----|
| <b>T</b>       | 21             | °C |
| <b>L</b>       | 51             | mm |
| <b>U</b>       | 30             | V  |
| <b>t</b>       | 24             | hr |
| <b>xd</b>      | 34.20          | mm |

Fuente: Elaboración Propia

- Para 20% de contenido de ceniza volante

Muestra No 1 – 20%FA

*Tabla 47 Muestra 1 - 20% FA*

| <b>Muestra</b> | <b>20 % FA</b> |    |
|----------------|----------------|----|
| <b>T</b>       | 21             | °C |
| <b>L</b>       | 50             | mm |
| <b>U</b>       | 30             | V  |
| <b>t</b>       | 24             | hr |
| <b>xd</b>      | 38.35          | mm |

Fuente: Elaboración Propia

Muestra No 2 – 20%FA

*Tabla 46 Muestra 2 - 20% FA*

| <b>Muestra</b> | <b>20 % FA</b> |    |
|----------------|----------------|----|
| <b>T</b>       | 21             | °C |
| <b>L</b>       | 50             | mm |
| <b>U</b>       | 30             | V  |
| <b>t</b>       | 24             | hr |
| <b>xd</b>      | 38.45          | mm |

Fuente: Elaboración Propia

Muestra No 3 – 20%FA

*Tabla 48 Muestra 3 - 20% FA*

| <b>Muestra</b> | <b>20 % FA</b> |    |
|----------------|----------------|----|
| <b>T</b>       | 21             | °C |
| <b>L</b>       | 51             | mm |
| <b>U</b>       | 30             | V  |
| <b>t</b>       | 24             | hr |
| <b>xd</b>      | 36.75          | mm |

Fuente: Elaboración Propia



- Para 30% de contenido de ceniza volante

#### Muestra No 1 – 30%FA

*Tabla 50 Muestra 1 - 30% FA*

| <b>Muestra</b> | <b>30 % FA</b> |    |
|----------------|----------------|----|
| <b>T</b>       | 21             | °C |
| <b>L</b>       | 51             | mm |
| <b>U</b>       | 30             | V  |
| <b>t</b>       | 24             | hr |
| <b>xd</b>      | 40.1           | mm |

Fuente: Elaboración Propia

#### Muestra No 2 – 30%FA

*Tabla 49 Muestra 2 - 30% FA*

| <b>Muestra</b> | <b>30 % FA</b> |    |
|----------------|----------------|----|
| <b>T</b>       | 21             | °C |
| <b>L</b>       | 51             | mm |
| <b>U</b>       | 30             | V  |
| <b>t</b>       | 24             | hr |
| <b>xd</b>      | 39.1           | mm |

Fuente: Elaboración Propia

#### Muestra No 3 – 30%FA

*Tabla 51 Muestra 3 - 30% FA*

| <b>Muestra</b> | <b>30 % FA</b> |    |
|----------------|----------------|----|
| <b>T</b>       | 21             | °C |
| <b>L</b>       | 50             | mm |
| <b>U</b>       | 30             | V  |
| <b>t</b>       | 24             | hr |
| <b>xd</b>      | 39.1           | mm |

Fuente: Elaboración Propia

### Cálculos:

Tomando como base la formula del coeficiente de difusión y remplazando cada valor obtenemos:

$$D_{nssm} = \frac{0.0239(273 + 21)(50)}{(30 - 2)24} \left( 32.65 - 0.238 \sqrt{\frac{(273 + 21)(50)(32.65)}{30 - 2}} \right)$$

$$D_{nssm} = 15,44 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$$

Este procedimiento se realiza para cada uno de los datos obtenidos en laboratorio de cada una de las muestras que con contenido de porcentaje de adición de ceniza volante diferente. A continuación, se evidencia los resultados obtenidos en la tabla resumen.

Tabla 52 Resultados Coeficiente de Difusión

| Dnssm    |                      |        |        |        |  |
|----------|----------------------|--------|--------|--------|--|
| Muestras | Porcentaje de Ceniza |        |        |        | Und                                    |
|          | 0% FA                | 10% FA | 20% FA | 30% FA |  |
| 1        | 15.44                | 16.49  | 18.28  | 19.52  | $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| 2        | 15.38                | 17.16  | 18.33  | 19.01  | $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| 3        | 15.57                | 16.52  | 17.82  | 18.66  | $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |

Fuente: Elaboración propia

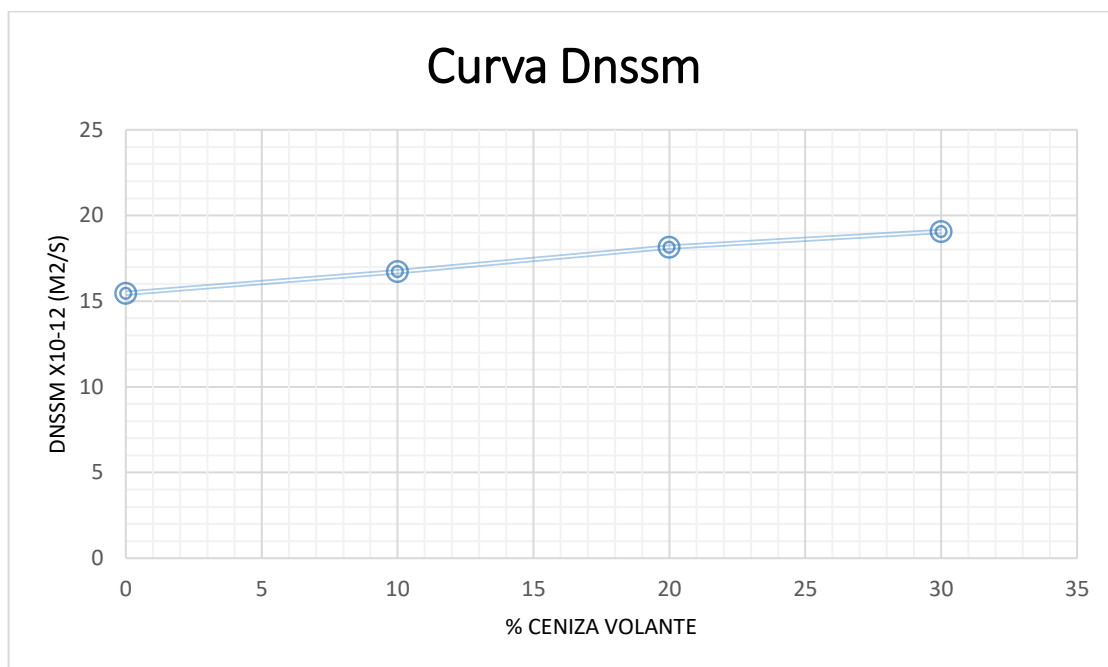
Para la elaboración de la gráfica coeficiente de difusión ( $D_{nssm}$ ) vs porcentaje de ceniza volante se realiza el promedio de los resultados obtenidos del coeficiente de difusión de cada una de las muestras. Ver tabla 38.

Tabla 53 Promedio Coeficiente de Difusión

| Muestra | $D_{nssm}$ | Und                                    |
|---------|------------|--|
| 0       | 15,46      | $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| 10      | 16,73      | $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| 20      | 18,15      | $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |
| 30      | 19,07      | $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ |

Fuente: Elaboración Propia

Gráfica 16 Perfil Coeficiente de Difusión



Fuente: Los Autores

En la tabla 50 y la gráfica 16 se observa que el porcentaje de ceniza volante del 30% presenta los coeficientes de difusión más elevados con respecto a las otras muestras, es decir que ion cloruro penetra de forma más rápida en las muestras que contienen la mayor cantidad de ceniza volante adicionada.

### 3.4 SORTIVIDAD

Para la determinar el porcentaje de absorción de una muestra de mortero, se realizó el ensayo de sortividad de acuerdo con la norma ASTM C1585-13 en la cual se describe el procedimiento adecuando para el desarrollo de este. Se llevo a cabo este ensayo en un periodo de 7 días en los cuales se realizó la toma de datos correspondientes a los pesos en los tiempos indicados.

#### Procedimiento

1. Inicialmente se debe tomar el peso seco de las muestras adecuadamente condicionadas, registrando este como tiempo inicial o tiempo cero.

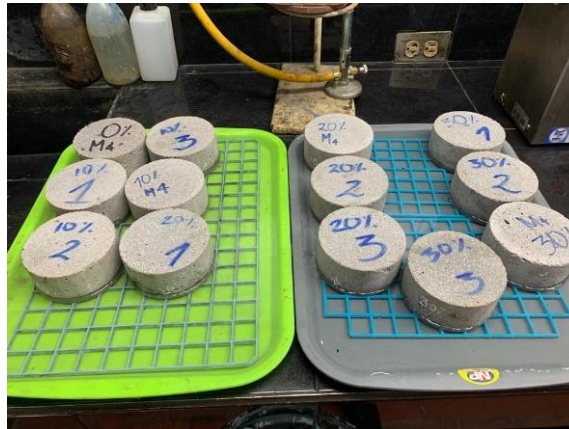
*Figura 24 Muestra seca ensayo Sortividad*



Fuente: Elaboración propia

2. Posteriormente se debe llenar un recipiente con 1 cm de agua, en donde se debe colocar las muestras sobre una lámina plástica con el fin de que las muestras absorben correctamente el agua necesaria para este ensayo.

*Figura 25. Montaje para ensayo de sortividad*



Fuente: Elaboración propia

3. Se debe registrar el peso de cada una de las muestras al minuto se haber sido colocadas en el agua. Y a continuación se debe realizar la toma de datos cada 5 minutos hasta completar 1 hora, Luego la toma de datos será cada hora completando un ciclo de 6 horas y finalmente de culmina con la toma de datos diarios hasta completar 7 días.

Figura 26 Toma de datos Sortividad



Fuente: Elaboración propia

## Cálculos

Se toma como ejemplo el peso de la muestra del 0% en un tiempo de 5 minutos obtenidos en el laboratorio.

Peso: 850.2 g

Tiempo: 300 s

Peso seco de la muestra del 0%: 229.8g

Para realizar el cálculo adecuado para el ensayo de sortividad, se debe trabajar con la raíz del tiempo, por lo tanto:

$$Tiempo = \sqrt{t} = \sqrt{300} = 17.32 \text{ s}$$

El  $\Delta$  de masa, se debe tener en cuenta el peso seco (peso inicial) de la muestra.

$$\Delta \text{ Masas} = \text{Masa}_i - \text{Masa}_{inicial} = 850.2g - 229.8 = 20.4g$$

Finalmente, se calcula la intensidad

$$I = \frac{\Delta \text{Masas}}{\frac{\pi}{4} * \emptyset^2 * \delta_{\text{agua}}} = \frac{20.4g}{\frac{\pi}{4} * 101.6mm^2 * 0.001 g/mm^3} = 2.109mm$$

Por medio del programa Excel se obtienen los valores de sortividad primaria, secundaria y el coeficiente de correlación para cada porcentaje de adición de ceniza volante.

- En la tabla se obtienen los valores de sortividad pertinentes de cada una de las muestras.

Tabla 54 Sortividad muestra 0%

| MUESTRA 0% |          |           |           |             |         |
|------------|----------|-----------|-----------|-------------|---------|
| Días       | segundos | Seg (1/2) | Masa (gr) | ΔMasas (gr) | ln (mm) |
|            | 0        | 0         | 829,8     | 0           | 0       |
|            | 60       | 7,746     | 846,9     | 17,1        | 2,109   |
|            | 300      | 17,321    | 850,2     | 20,4        | 2,516   |
|            | 600      | 24,495    | 851,3     | 21,5        | 2,652   |
|            | 900      | 30,000    | 852,9     | 23,1        | 2,849   |
|            | 1200     | 34,641    | 853,9     | 24,1        | 2,973   |
|            | 1500     | 38,730    | 854,5     | 24,7        | 3,047   |
|            | 1800     | 42,426    | 855,2     | 25,4        | 3,133   |
|            | 2100     | 45,826    | 856       | 26,2        | 3,232   |
|            | 2400     | 48,990    | 856,5     | 26,7        | 3,293   |
|            | 2700     | 51,962    | 857,3     | 27,5        | 3,392   |
|            | 3000     | 54,772    | 857,6     | 27,8        | 3,429   |
|            | 3300     | 57,446    | 858       | 28,2        | 3,478   |
|            | 3600     | 60,000    | 858,6     | 28,8        | 3,552   |
|            | 7200     | 84,853    | 862,6     | 32,8        | 4,046   |
| 1          | 86400    | 293,939   | 879,2     | 49,4        | 6,093   |
| 3          | 259200   | 509,117   | 881,3     | 51,5        | 6,352   |
| 4          | 345600   | 587,878   | 883,4     | 53,6        | 6,611   |
| 6          | 518400   | 720,000   | 886,8     | 57          | 7,031   |
| 7          | 604800   | 777,689   | 889,7     | 59,9        | 7,388   |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 55 Sortividad muestra 10%

| MUESTRA 10% |          |           |           |                |         |
|-------------|----------|-----------|-----------|----------------|---------|
| Días        | segundos | Seg (1/2) | Masa (gr) | $\Delta$ Masas | ln (mm) |
|             | 0        | 0         | 840,725   | 0              | 0       |
|             | 60       | 7,746     | 852,1     | 11,375         | 1,403   |
|             | 300      | 17,321    | 853,9     | 13,175         | 1,625   |
|             | 600      | 24,495    | 854,725   | 14             | 1,727   |
|             | 900      | 30,000    | 855,375   | 14,65          | 1,807   |
|             | 1200     | 34,641    | 855,775   | 15,05          | 1,856   |
|             | 1500     | 38,730    | 856       | 15,275         | 1,884   |
|             | 1800     | 42,426    | 856,4     | 15,675         | 1,933   |
|             | 2100     | 45,826    | 856,8     | 16,075         | 1,983   |
|             | 2400     | 48,990    | 857,15    | 16,425         | 2,026   |
|             | 2700     | 51,962    | 857,225   | 16,5           | 2,035   |
|             | 3000     | 54,772    | 857,4     | 16,675         | 2,057   |
|             | 3300     | 57,446    | 857,975   | 17,25          | 2,128   |
|             | 3600     | 60,000    | 858,175   | 17,45          | 2,152   |
|             | 7200     | 84,853    | 859,925   | 19,2           | 2,368   |
| 1           | 86400    | 293,939   | 870,075   | 29,35          | 3,620   |
| 3           | 259200   | 509,117   | 873,7     | 32,975         | 4,067   |
| 4           | 345600   | 587,878   | 882,075   | 41,35          | 5,100   |
| 6           | 518400   | 720,000   | 884,95    | 44,225         | 5,455   |
| 7           | 604800   | 777,689   | 890,4     | 49,675         | 6,127   |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 56 Sortividad 20%

| MUESTRA 20% |          |           |           |                |         |
|-------------|----------|-----------|-----------|----------------|---------|
| Días        | segundos | Seg (1/2) | Masa (gr) | $\Delta$ Masas | ln (mm) |
|             | 0        | 0         | 821,95    | 0              | 0       |
|             | 60       | 7,746     | 832,475   | 10,525         | 1,298   |
|             | 300      | 17,321    | 835,3     | 13,35          | 1,647   |
|             | 600      | 24,495    | 836,525   | 14,575         | 1,798   |
|             | 900      | 30,000    | 837,525   | 15,575         | 1,921   |
|             | 1200     | 34,641    | 837,45    | 15,5           | 1,912   |
|             | 1500     | 38,730    | 837,875   | 15,925         | 1,964   |
|             | 1800     | 42,426    | 838,175   | 16,225         | 2,001   |
|             | 2100     | 45,826    | 838,475   | 16,525         | 2,038   |
|             | 2400     | 48,990    | 838,925   | 16,975         | 2,094   |
|             | 2700     | 51,962    | 839,2     | 17,25          | 2,128   |
|             | 3000     | 54,772    | 839,325   | 17,375         | 2,143   |
|             | 3300     | 57,446    | 839,7     | 17,75          | 2,189   |
|             | 3600     | 60,000    | 839,975   | 18,025         | 2,223   |
|             | 7200     | 84,853    | 840,2     | 18,25          | 2,251   |
| 1           | 86400    | 293,939   | 851,175   | 29,225         | 3,605   |
| 3           | 259200   | 509,117   | 855,6     | 33,65          | 4,151   |
| 4           | 345600   | 587,878   | 863,425   | 41,475         | 5,116   |
| 6           | 518400   | 720,000   | 866,825   | 44,875         | 5,535   |
| 7           | 604800   | 777,689   | 872,2     | 50,25          | 6,198   |

Fuente: Elaboración propia



Tabla 57 Sortividad 30%

| MUESTRA 30% |          |           |           |         |         |
|-------------|----------|-----------|-----------|---------|---------|
| Días        | segundos | Seg (1/2) | Masa (gr) | Δ Masas | ln (mm) |
|             | 0        | 0         | 816,4     | 0       | 0       |
|             | 60       | 7,746     | 827,1     | 10,7    | 1,320   |
|             | 300      | 17,321    | 831,125   | 14,725  | 1,816   |
|             | 600      | 24,495    | 832,725   | 16,325  | 2,014   |
|             | 900      | 30,000    | 833,125   | 16,725  | 2,063   |
|             | 1200     | 34,641    | 833,65    | 17,25   | 2,128   |
|             | 1500     | 38,730    | 833,8     | 17,4    | 2,146   |
|             | 1800     | 42,426    | 834,4     | 18      | 2,220   |
|             | 2100     | 45,826    | 834,575   | 18,175  | 2,242   |
|             | 2400     | 48,990    | 835,075   | 18,675  | 2,303   |
|             | 2700     | 51,962    | 835,275   | 18,875  | 2,328   |
|             | 3000     | 54,772    | 835,525   | 19,125  | 2,359   |
|             | 3300     | 57,446    | 835,925   | 19,525  | 2,408   |
|             | 3600     | 60,000    | 836,425   | 20,025  | 2,470   |
|             | 7200     | 84,853    | 837,875   | 21,475  | 2,649   |
| 1           | 86400    | 293,939   | 845,625   | 29,225  | 3,605   |
| 3           | 259200   | 509,117   | 850,6     | 34,2    | 4,218   |
| 4           | 345600   | 587,878   | 857,175   | 40,775  | 5,029   |
| 6           | 518400   | 720,000   | 861,75    | 45,35   | 5,594   |
| 7           | 604800   | 777,689   | 867,925   | 51,525  | 6,355   |

Fuente: Elaboración propia

Siendo una ecuación lineal  $y = mx + b$  se determina el valor de la sortividad inicial y secundaria por medio de Excel. En la tabla 1 se puede observar un resumen de los datos obtenidos de la sortividad inicial y secundaria para el porcentaje de adición de ceniza volante de cada muestra. y desde la gráfica 12 hasta la 15.0

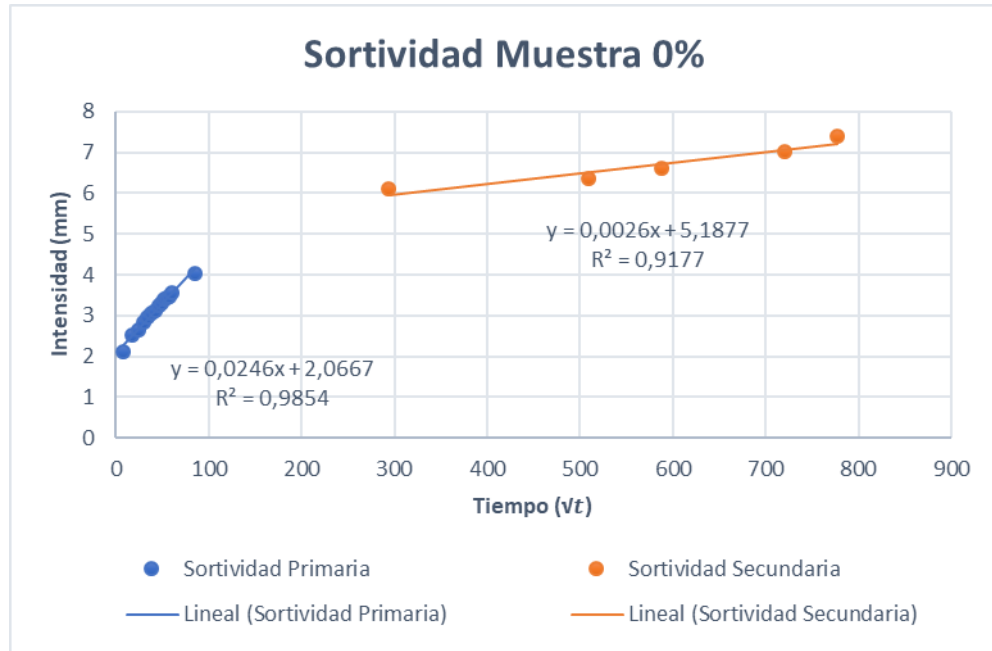
Tabla 58 Sortividad Para todas las muestras

| Sortividad                    |        |        |        |        |
|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|
| Sortividad Inicial (mm/vt)    |        |        |        |        |
| Muestra                       | 0%     | 10%    | 20%    | 30%    |
|                               | 0,0369 | 0,0205 | 0,0206 | 0,0244 |
| Sortividad Secundaria (mm/vt) |        |        |        |        |
| Muestra                       | 0%     | 10%    | 20%    | 30%    |
|                               | 0,0026 | 0,0051 | 0,0053 | 0,0055 |

Fuente: Elaboración propia

- **Muestra 0%**

Gráfica 17 Sortividad Muestra 0%

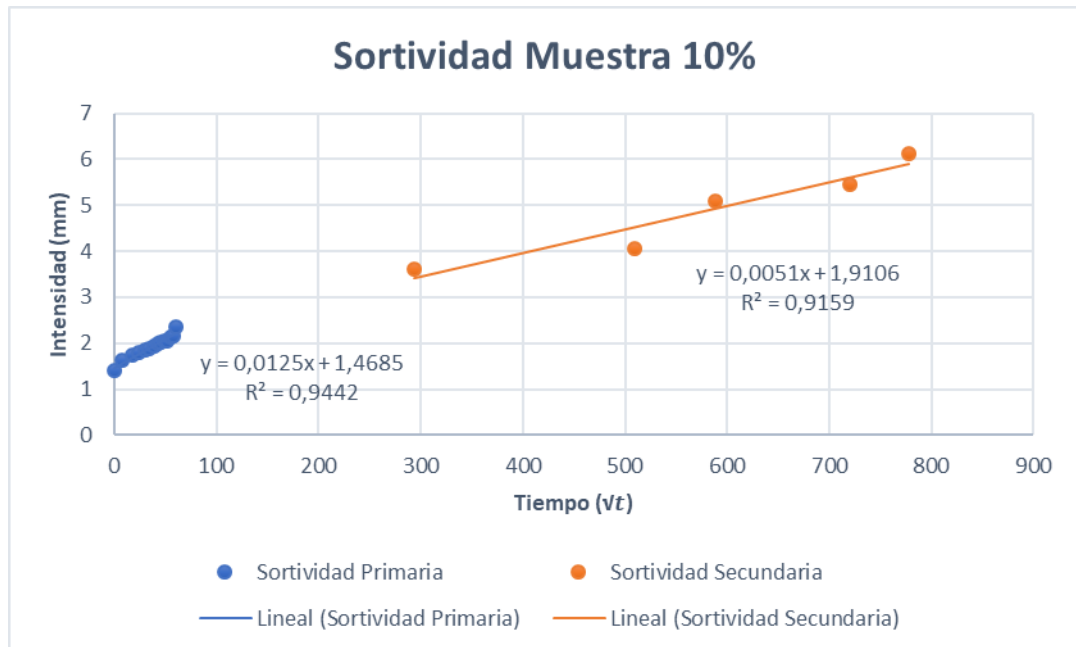


Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la gráfica 17 se observa que la intensidad aumenta con relación al tiempo, lo que indica que en la sortividad inicial la muestra se encuentra totalmente seca y absorbe más contenido de agua ( $0.0121\text{mm}/\sqrt{t}$ ) que en la segunda sortividad ( $0.005\text{mm}/\sqrt{t}$ ), presentando un error 2.55% en la sortividad primaria y sortividad secundaria con 8.41% de margen de error.

- **Muestra 10%**

Gráfica 18 Sortividad Muestra 10%

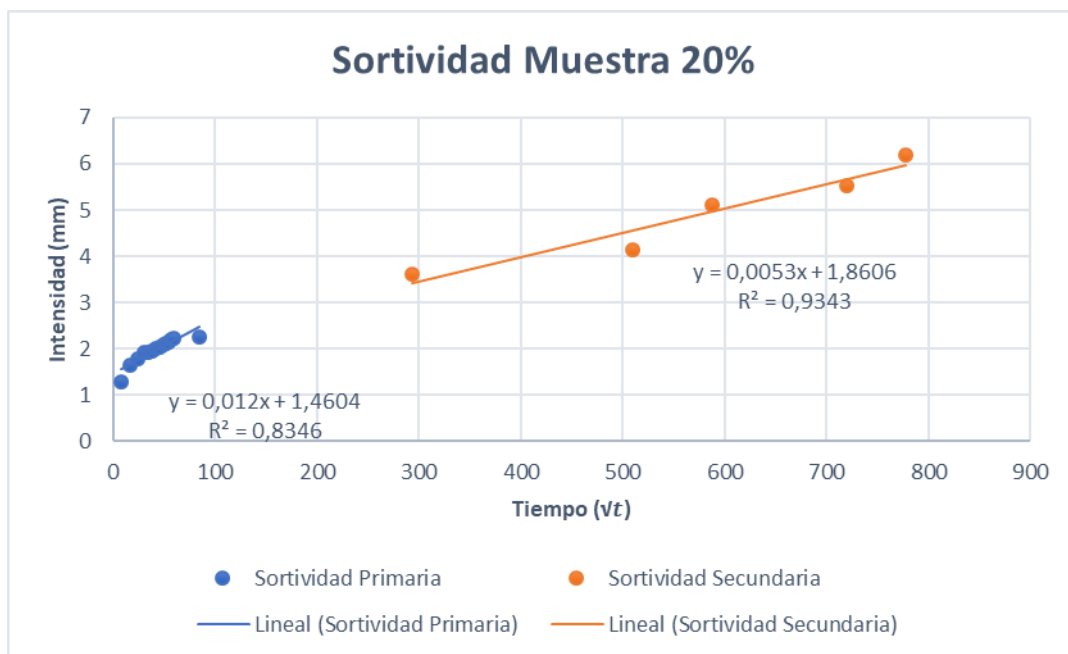


Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la gráfica 18 se observa que la intensidad aumenta con relación al tiempo, lo que indica que en la sortividad inicial la muestra se encuentra totalmente seca y absorbe más contenido de agua ( $0.0121mm/\sqrt{t}$ ) que en la segunda sortividad ( $0.005mm/\sqrt{t}$ ), presentando un error 2.55% en la sortividad primaria y sortividad secundaria con 8.41% de margen de error.

- **Muestra del 20%**

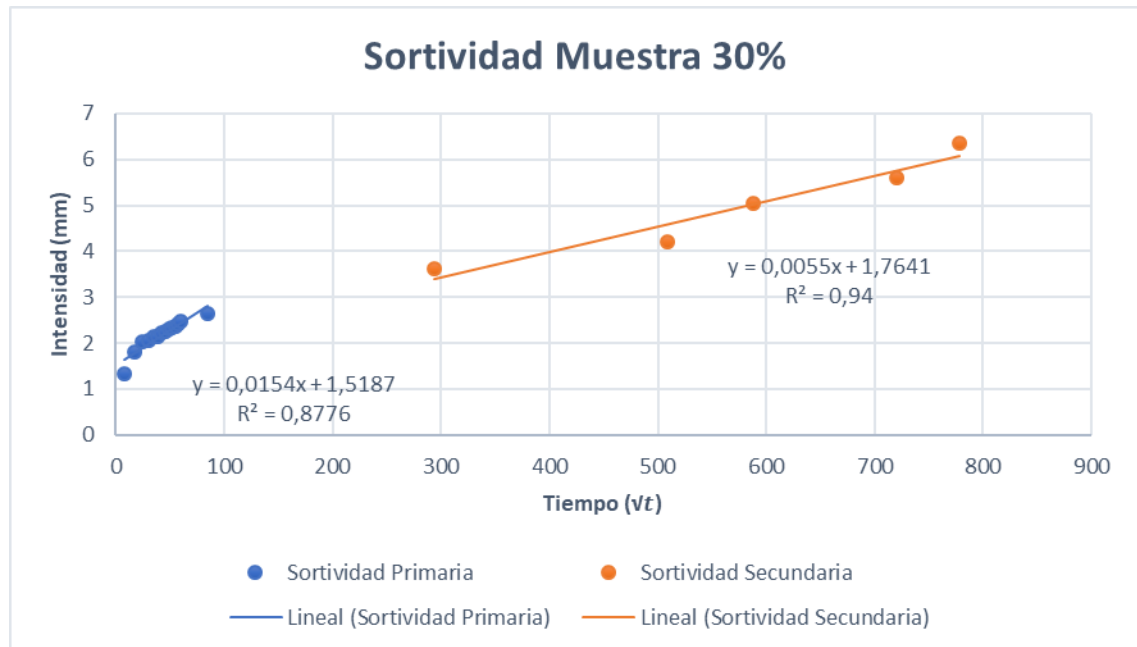
Gráfica 19 Sortividad Muestra 20%



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la gráfica 19 se observa que la intensidad aumenta con relación al tiempo, lo que indica que en la sortividad inicial la muestra se encuentra totalmente seca y absorbe más contenido de agua ( $0.0121mm/\sqrt{t}$ ) que en la segunda sortividad ( $0.005mm/\sqrt{t}$ ), presentando un error 2.55% en la sortividad primaria y sortividad secundaria con 8.41% de margen de error.

Gráfica 20 Sortividad Muestra 30%



Fuente: Elaboración propia

De acuerdo a la gráfica 20 se observa que la intensidad aumenta con relación al tiempo, lo que indica que en la sortividad inicial la muestra se encuentra totalmente seca y absorbe más contenido de agua ( $0,0121\text{mm}/\sqrt{t}$ ) que en la segunda sortividad ( $0,005\text{mm}/\sqrt{t}$ ), presentando un error 2.55% en la sortividad primaria y sortividad secundaria con 8.41% de margen de error.

## 4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

De acuerdo con la gráfica 12, en la muestra del contenido de ceniza volante del 0% se evidencia un porcentaje de porosidad del 17%; al aumentar el contenido del mineral, se observa que entre el 10 y 30% de adición de ceniza volante el porcentaje de porosidad disminuye a un 13% y tiende a mantenerse con un comportamiento constante.

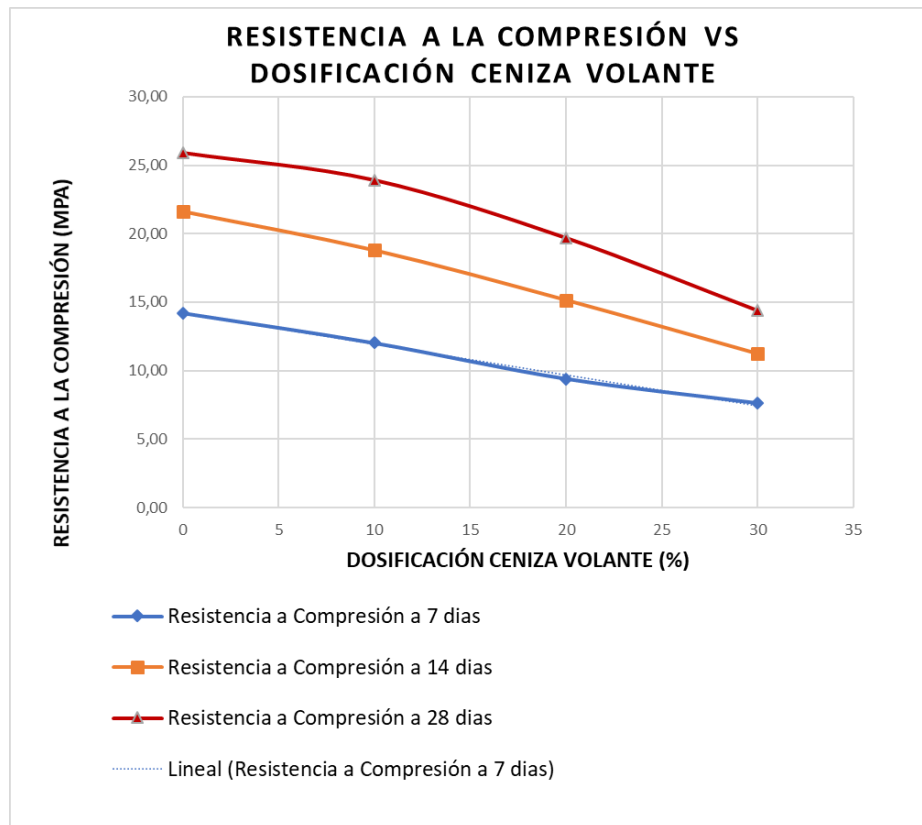
En la gráfica 13 y 14, se observa que el contenido de ceniza volante es inversamente proporcional a la densidad aparente y volumétrica; puesto que a mayor contenido del mineral adicionado a las muestras disminuye la cantidad de poros reduciendo su volumen ocupado, haciendo que la muestra sea más compacta.

En las muestras elaboradas de mortero se evidencia que con la adición de la ceniza volante se reducen las propiedades físicas y mecánicas, haciendo que la resistencia a la compresión disminuya entre un rango de 25 a 15 MPa (Gráfica 11). Se determina el módulo de elasticidad a un 40% del esfuerzo de compresión de cada muestra con su respectivo contenido de mineral. (Gráfica 10). El módulo de elasticidad disminuye gradualmente a mayor contenido de ceniza volante, haciendo que este material sea menos elástico influyendo en la recuperación de estado inicial.

Los valores obtenidos del coeficiente de migración no cumplieron con las expectativas, ya que se esperaba que, al adicionar la ceniza volante como aditivo al mortero, disminuyera la penetración del ion cloruro. Con base en la gráfica 15 se puede evidenciar que la penetración del ion cloruro aumenta con relación al porcentaje de adición de ceniza volante, entre un rango de  $15 \text{ a } 20 * 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ;

por lo tanto, disminuye su resistencia con el paso del tiempo, haciendo que este material no sea adecuado para ser implementado.

Gráfica 21 Resistencia a la compresión Vs Dosificación Ceniza Volante



Fuente: Elaboración propia

A partir de la gráfica 21, se realizó la comparación entre la resistencia a la compresión en los días 7, 14 y 28 de las muestras de mortero con el porcentaje de adición de ceniza volante 0% 10% 20% 30%; a partir de esto, se considera que al adicionar mayor cantidad de dicho mineral genera decrecimiento en las propiedades mecánicas, teniendo un comportamiento inversamente proporcional. Esto surge debido a que la ceniza TERMOPAIPA implementada contiene un gran porcentaje

de pérdida en presencia del fuego, generando una gran cantidad de inquemados que influyen negativamente en los ensayos de las muestras de mortero.

De acuerdo con los resultados presentados en las gráficas 18, 19, 20 y 21 se evidencia que la sortividad inicial es mayor debido a que la muestra en su estado inicial se encuentra totalmente seca; por ende, su capacidad de absorción es más alta. Con base en esto, la sortividad secundaria disminuye por causa de la saturación existente a los 7 días en la muestra; por lo tanto, se determina que la absorción y el tiempo presentan un comportamiento lineal ascendente.

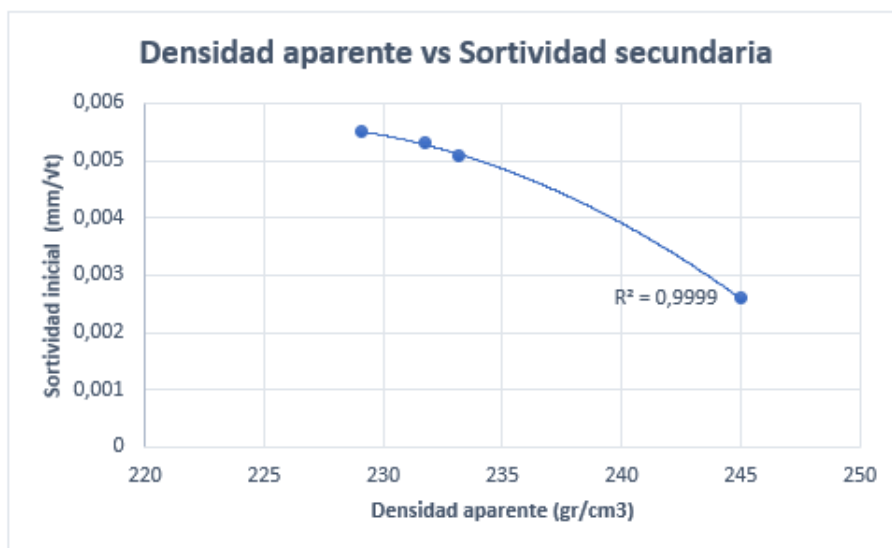
*Gráfica 22 Densidad aparente vs Sortividad inicial*



Fuente: Elaboración propia



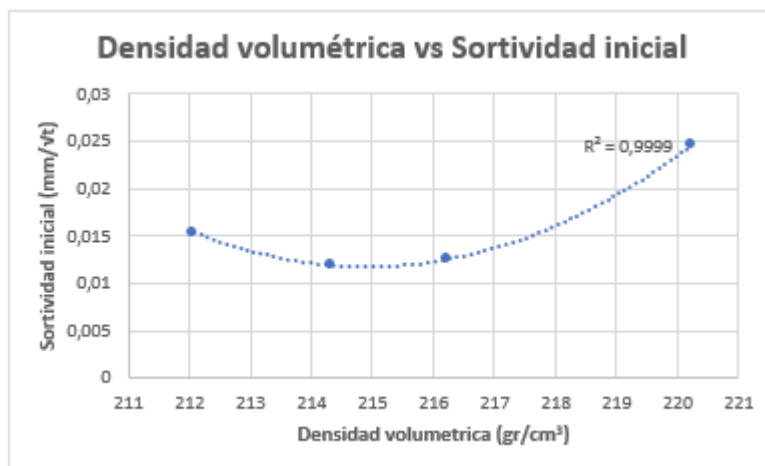
Gráfica 23 Densidad aparente Vs Sortividad secundaria



Fuente: Elaboración propia

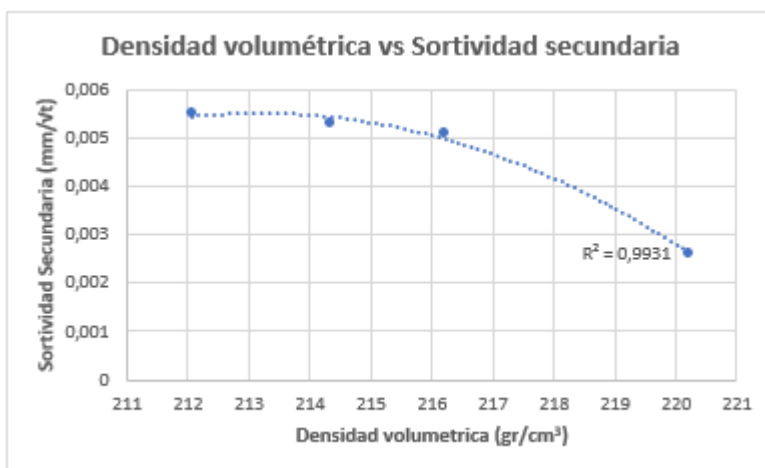
En las gráficas 22 y 23 se relaciona la densidad aparente y la sortividad, en las cuales se observa que la sortividad inicial aumenta en función de la densidad debido a que se presenta un comportamiento parabólico positivo de segundo grado, con un error de 0.75%; lo que indica que no existe ninguna relación proporcional entre estas dos variables. Por consiguiente, al mantener un volumen de muestra constante y aumentar el porcentaje de ceniza volante, la densidad disminuye Ver grafica 13. En la segunda grafica disminuye la densidad aparente trazando una curva polinómica negativa de segundo orden.

Gráfica 24 Densidad volumétrica vs Sortividad inicial



Fuente: Elaboración propia

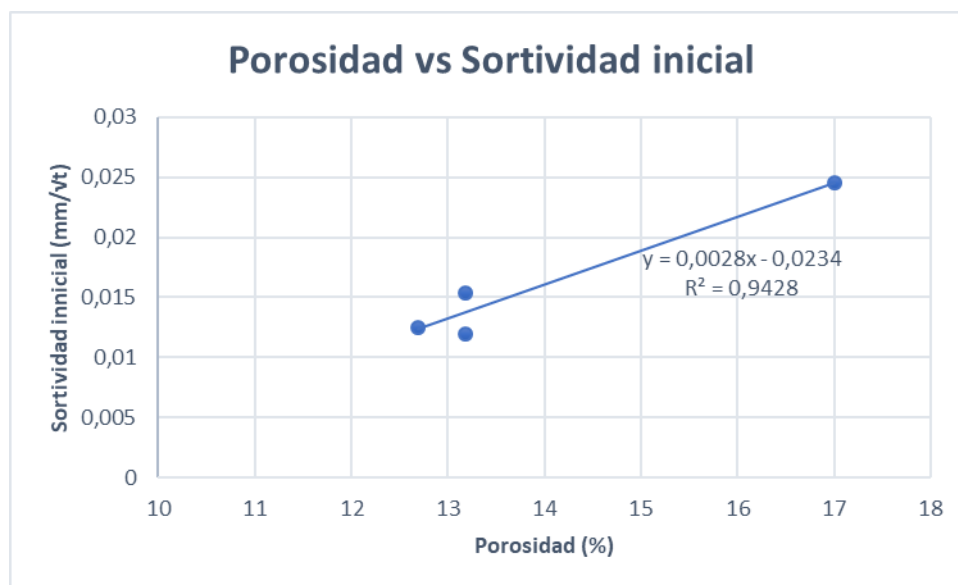
Gráfica 25 Densidad volumétrica vs Sortividad



Fuente: Elaboración propia

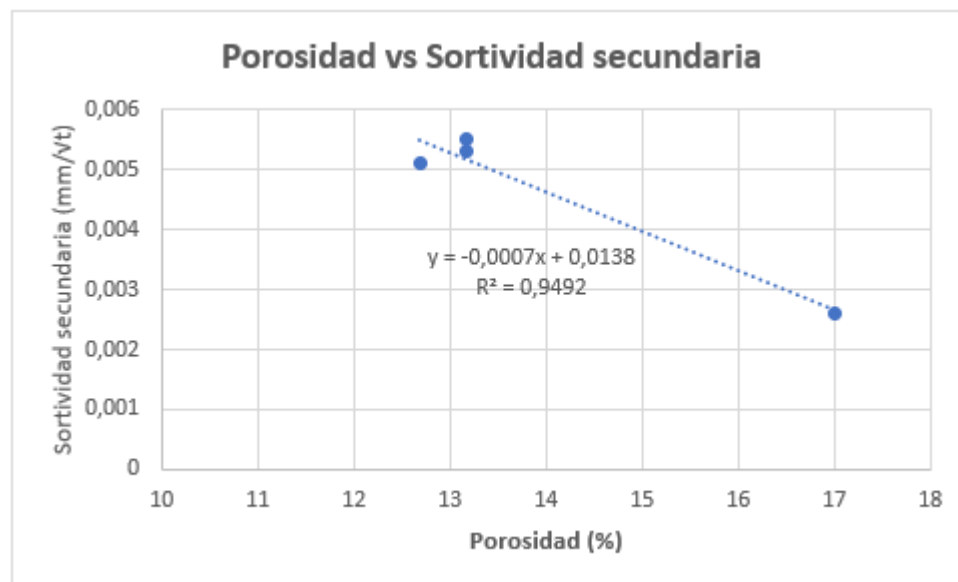
En la gráfica tal 24 se observa que la densidad volumétrica afecta crecientemente la sortividad inicial, con relación a la gráfica de densidad aparente vs sortividad, se observa que no existe un margen de error relevante ya que es menor al 1%. Lo que indica que hay una relación muy estrecha entre estas dos variables. En la sortividad secundaria se presenta el efecto contrario, sin embargo, se mantiene un alto grado de correlación entre densidad y sortividad.

Gráfica 26 Porosidad vs Sortividad inicial



Fuente: Elaboración propia

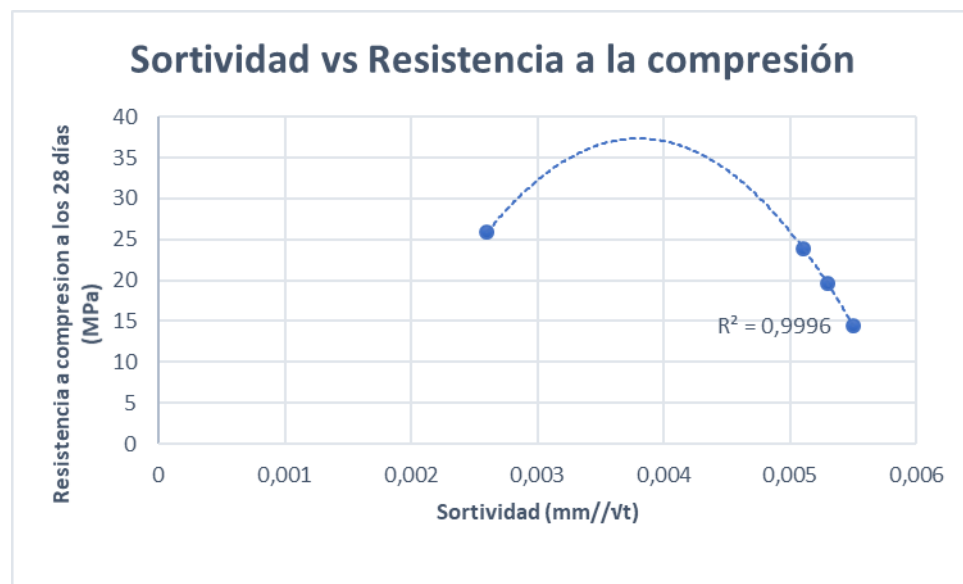
Gráfica 27 Porosidad vs Sortividad secundaria



Fuente: Elaboración propia

La relación entre la Porosidad y la sortividad inicial tiene un comportamiento lineal ascendente, con un margen de error de 5.72%; lo que indica que las muestras ensayadas tienen mayor porcentaje de porosidad, por lo tanto, absorben aceleradamente saturando sus vacíos; Ver grafica 25. En la sortividad secundaria ocurre el efecto contrario con un 5.08% de error, debido a que sus vacíos se encuentran parcialmente saturados y su capacidad de absorción disminuye considerablemente, ver grafica 27.

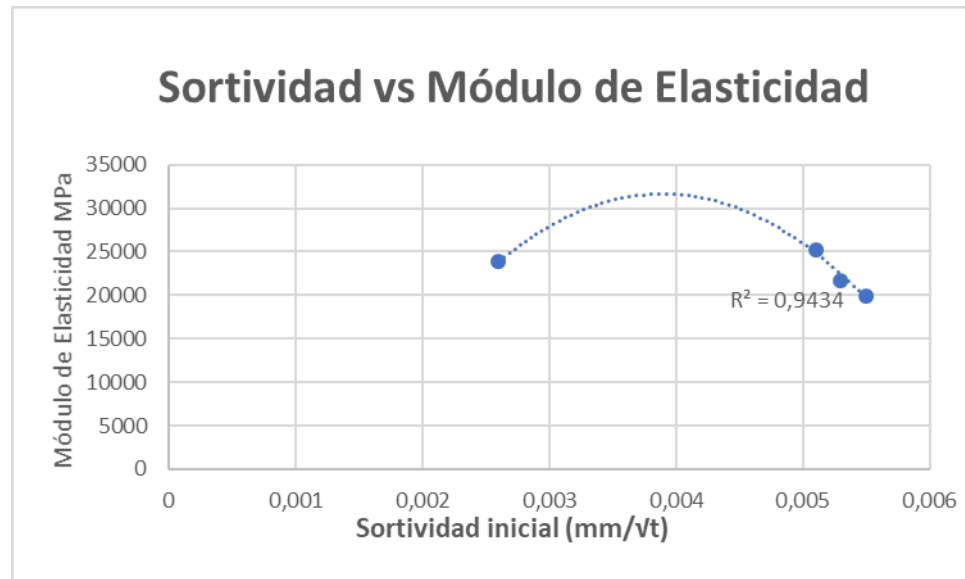
Gráfica 28 Sortividad vs Resistencia a la compresión



Fuente: Elaboración propia

La resistencia a la compresión de las muestras de mortero se vio afectadas significativamente debido a que el material implementado es poroso y permite el ingreso de fluidos, como se observa en la gráfica 28 la resistencia a compresión depende del comportamiento de la sortividad secundaria, evidenciando un margen de error 0.4%.

Gráfica 29 Sortividad vs Módulo de Elasticidad

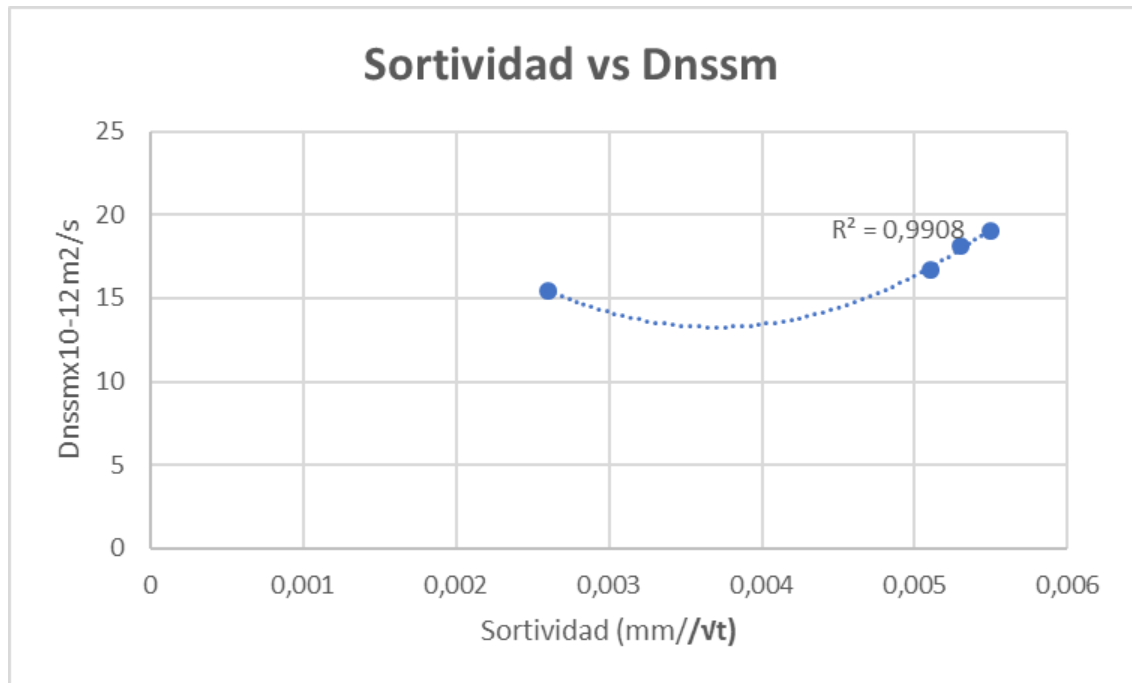


Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 29 se relacionó sortividad contra módulo de elasticidad del mortero, donde se observa que esta disminuye, sin que exista una tendencia lineal, por el contrario, se observa un comportamiento cuadrático negativo.

A partir de lo anterior se infiere que no solo la sortividad incide en el comportamiento de módulo de elasticidad, sino que también se ve influenciado también por la calidad y cantidad de los componentes de la mezcla de mortero.

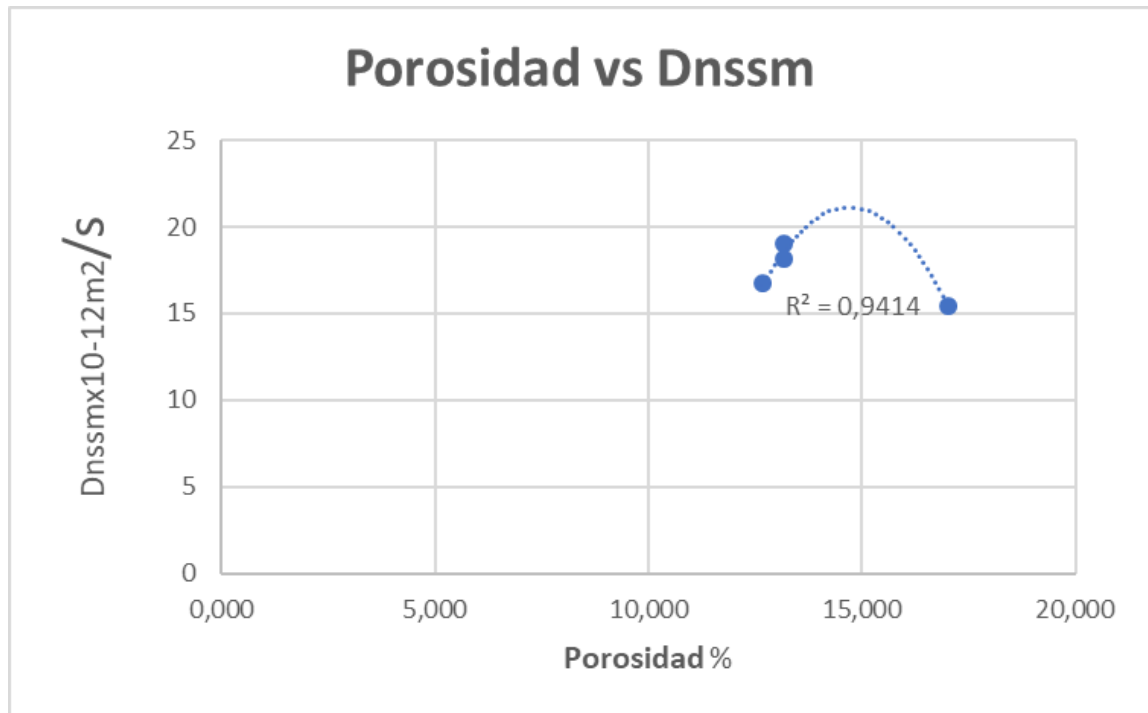
Gráfica 30 Sortividad vs Dnssm



Fuente: Elaboración propia

En la gráfica 30. Se relacionó el Dnssm en función de la sortividad, se considera una función cuadrática positiva que puede ser alterada por las condiciones del fluido con el que se realizó el ensayo y por el proceso de fabricación de la muestra, debido a esto, los especímenes se evidenció algunas variaciones con respecto a la porosidad.

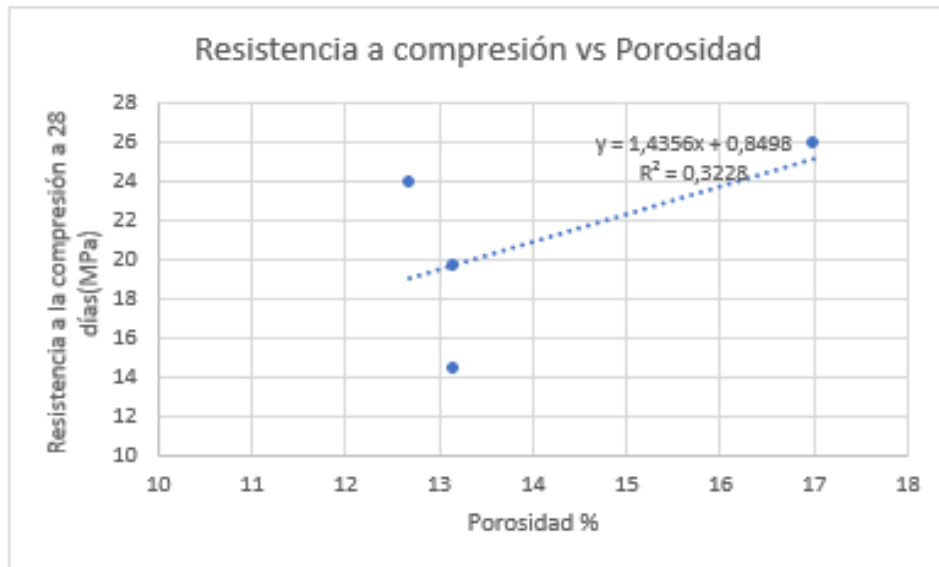
Gráfica 31 Porosidad vs Dnssm



Fuente: Elaboración propia

En la relación Porosidad vs Dnssm, indica que los poros existentes en la muestra permiten el ingreso del ion cloruro. De acuerdo con la gráfica 31 se evidencia que con aproximadamente un 15% de porosidad se establece una óptima penetración con base a un patrón de comportamiento cuadrático negativo.

Gráfica 32 Resistencia a compresión vs Porosidad



Fuente: Elaboración propia

En términos generales, la resistencia a la compresión se ve influenciada por el porcentaje de porosidad, ya que este tiende a reducir la capacidad de soportar fuerzas ejercidas hacia el interior de eje axial de las muestras de cilindros de mortero.

Se evidencia en la gráfica 32 una inconsistencia en los resultados obtenidos y por ende se presenta un margen de error aproximado del 67%. Esto se debe a errores presentados en el proceso de compactación y vibrado del espécimen de mortero. En la gráfica 12 se evidencia que la muestra del 10% presenta una anomalía en la magnitud de saturación comparado con las muestras del 20% y 30%.



## **5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **5.1 CONCLUSIONES**

A partir de los resultados obtenidos en el desarrollo de los ensayos de laboratorio, se evidencia que no son los esperados con relación a la teoría, puesto que el empleo de la ceniza volante en la fabricación de mortero genera una disminución en cuanto a la resistencia mecánica, el módulo de elasticidad y porcentaje de poros y vacíos; pero genera un aumento en la permeabilidad a cloruros, debido a que este mineral favorece el transporte de soluciones a través del hormigón.

La ceniza volante implementada en esta investigación no era completamente pura, puesto que poseía alto contenido de inquemados haciendo que disminuya las propiedades físicas y mecánicas del mortero.

La ceniza volante en altas cantidades no es un material adecuado para ser implementado en el sector de la construcción, ya que disminuye las propiedades mecánicas del mortero haciendo que la penetración del ion cloruro aumente con relación al porcentaje adicionado del mineral.

La sortividad secundaria tiene mayor relevancia al momento de realizar los análisis de resultados, debido a que tienen un comportamiento constante en comparación con la sortividad inicial, ya que esta demuestra un comportamiento más acelerado lo que genera gráficos y resultados poco relevantes.

Con base al ensayo NT BUILD 492 se evidencia que al mayor aumento de porcentaje de ceniza presenta los coeficientes de difusión más elevados es decir que ion cloruro penetra de forma más rápida en los especímenes, esta migración del ion representa problemas en estructuras con acero de refuerzo debido a que deteriora la vida útil y acelera problemas de corrosión, resistencia y durabilidad.

## **5.2 RECOMENDACIONES**

Se debe tener en cuenta que para implementar algún material como adición a una mezcla de mortero se debe verificar su origen y estándares de calidad, debido a que según su grado de contaminación se verá reflejado significativamente en las propiedades mecánicas y físicas del material.

Para investigaciones futuras se sugiere implementar la ceniza volante en menores porcentajes al 10%, debido a que en esta investigación se demostró que en cantidades mayores al indicado anteriormente las propiedades mecánicas y físicas del material disminuyen haciendo que este material no sea recomendado para su implementación con propósitos estructurales.

Hay que ser minuciosos en el proceso de fabricación, debido a que si no se desarrolla adecuadamente esto podría repercutir en la toma y análisis de datos generando alteraciones no esperadas y un alto margen de error; por lo tanto, la investigación se tornará inaprovechable para temas académicos o futuras investigaciones.

Se debe contar con un equipo adecuado para la correcta realización de los ensayos, así como de una orientación profesional de docentes o personal de laboratorio, con el fin de lograr resultados satisfactorios, que brinde respuesta a los interrogantes planteados.

## 6 BIBLIOGRAFÍA

- AMADOR, A., 2014. Corrosión del acero en el hormigon armado. *MÁS QUE INGENIERÍA* [en línea]. [Consulta: 22 agosto 2018]. Disponible en: <https://masqueingenieria.com/blog/corrosion-acero-hormigon-armado/>.
- ASSI LATEEF, CARTER KEALY, DEEVER EDWARD (EDDIE), ANAY RAFAL, Z.P., 2018. Sustainable concrete: Building a greener future. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 198, pp. 1641-1651. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2018.07.123. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.123>.
- ASTM C1202, 2012. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration. *American Society for Testing and Materials.*, no. C, pp. 1-8. DOI 10.1520/C1202-12.2.
- CÁCERES HUAQUISTO, S. y BELIZARIO QUISPE, G., 2018. Utilización de la ceniza volante en la dosificación del concreto como sustituto del cemento. *Revista de Investigaciones Altoandinas* [en línea], vol. 20, no. 2, pp. 225-234. Disponible en: <http://huajsapata.unap.edu.pe/ria/index.php/ria/article/view/366/334>.
- CASTELLOTE, M., FERNANDEZ, L., ANDRADE, C. y ALONSO, C., 2009. Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO2 concentrations. *Materials and Structures* [en línea], vol. 42, no. 4, pp. 515-525. ISSN 1359-5997. DOI 10.1617/s11527-008-9399-1. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/225332231/download>.
- CEDEX, 2011. FICHA TÉCNICA CENIZAS VOLANTES DE CARBÓN Y CENIZAS DE HOGAR O ESCORIAS. *Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas*. [en línea]. [Consulta: 3 septiembre 2018]. Disponible en: <http://www.cedexmateriales.es/catalogo-de-residuos/24/diciembre-2011/>.
- FONSECA BARRERA, L., 2016. *Empleo de ceniza volante colombiana como material cementicio suplementario y sus efectos sobre la fijación de cloruros en concretos* [en línea]. S.I.: Universidad Nacional de Colombia. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/53975/>.
- GONZÁLEZ DÍAZ, J.E., 2014. *Modelos De Penetración Del Ión Cloruro Orientados a La Predicción De La Vida Útil De Las Estructuras De Concreto* [en línea]. S.I.: Universidad Nacional de Colombia. Disponible en: <http://www.bdigital.unal.edu.co/46257/>.

- GUILLERMO, R.-R., WILLIAM, A.-C. y EMILIO, D.-T., 2015. Diseño de sistema de monitoreo remoto para evaluación de la corrosión en estructuras de concreto reforzado sometidas a ion cloruro. *Ingeniería, Investigación y Tecnología* [en línea], vol. 16, no. 4, pp. 565-572. ISSN 14057743. DOI 10.1016/j.riit.2015.09.008. Disponible en: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1405774315000414>.
- LIZARAZO-MARRIAGA, J. y CLAISSE, P., 2010. Determination of the transport properties of a blended concrete from its electrical properties measured during a migration test. *Magazine of Concrete Research* [en línea], vol. 62, no. 3, pp. 163-175. ISSN 0024-9831. DOI 10.1680/mac.2010.62.3.163. Disponible en: <https://www.scopus.com/inward/record.uri?eid=2-s2.0-77952921601&doi=10.1680%2Fmac.2010.62.3.163&partnerID=40&md5=69abb3936ac1805acd3935fb4d14caf5>.
- LOPEZ, R.A., 2000. La utilización de las cenizas volantes según el reciente simposio de Pittsburgh. *Materiales de Construcción* [en línea], vol. 17, pp. 615-51. Disponible en: <http://materconstrucc.revistas.csic.es>.
- MARCHAND J. y SAMSON EGEG, 2009. Predicting the service-life of concrete structures – Limitations of simplified models. *Cement and Concrete Composites* [en línea], vol. 31, no. 8, pp. 515-521. ISSN 09589465. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2009.01.007. Disponible en: <https://www.deepdyve.com/lp/elsevier/predicting-the-service-life-of-concrete-structures-limitations-of-rlAyVROYZI?>
- MARRIAGA, J.L. y CLAISSE, P., 2011. Influencia de la adición de escoria de alto horno en la penetración de los cloruros en el concreto. *Ingeniería e Investigación* [en línea], vol. 31, no. 2, pp. 38-47. ISSN 01205609. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=64322334005>.
- MARTÍNEZ MARTUSCIELLO, G. VALLETTA, P., 2009. *CARBONATACION Y CORROSION POR CARBONATACION: CAUSAS PREVISIBLES- ESTUDIO DE CASO*. S.l.: s.n.
- MEJÍA DE GUTIÉRREZ RUBY, RODRÍGUEZ CESAR, RODRÍGUEZ ERICH, TORRES JANNETH, S.D., 2009. Concreto adicionado con metacaolín: Comportamiento a carbonatación y cloruros. *Revista Facultad de Ingeniería*, no. 48, pp. 55-64. ISSN 01206230.
- NACE INTERNATIONAL INSTITUTE, 2013. Corrosion 2013 come experience the Power of Nace. [en línea]. [Consulta: 14 septiembre 2018]. Disponible en: <http://events.nace.org/conferences/c2013/president.asp>.

- NT BUILD 492, 1999. Concrete, mortar and cement-based repair materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments. *Measurement*, pp. 1-8. ISSN 0283-7153. DOI UDC 691.32/691.53/691.54.
- PARIS JERRY M., ROESSLER JUSTIN G., FERRARO CHRISTOPHER C., DEFORD HARVEY D., T.T.G., 2016. A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete. *Journal of Cleaner Production* [en línea], vol. 121, pp. 1-18. ISSN 09596526. DOI 10.1016/j.jclepro.2016.02.013. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.02.013>.
- RAMÓN CORRAL, H., SUSANA ARREDONDO, R., JORGE ALMARAL, S. y JOSÉ GÓMEZ, S., 2013. Corrosión por cloruros del acero de refuerzo embebido en concreto con agregado grueso reciclado y materiales cementantes suplementarios. *Revista Ingenieria de Construccion RIC* [en línea], vol. 28, no. 1, pp. 21-35. ISSN 07162952. DOI 10.4067/SO718-50732013000100002. Disponible en: <http://www.ricuc.cl/index.php/ric/article/view/482/pdf>.
- RIVERA JOFRÉ FELIPE ANDRES, LÓPEZ CASANOVA MAURICIO ALEJANDRO, CASTRO SEPÚLVEDA JAVIER EDUARDO, M.R.P.H., 2013. Evaluación del uso de altos volúmenes de cenizas volantes en el hormigón. *ResearchGate* [en línea], no. October, pp. 17. Disponible en: [https://www.researchgate.net/publication/312898623\\_Evaluacion\\_del\\_uso\\_de\\_altos\\_volumenes\\_de\\_cenizas\\_volantes\\_en\\_el\\_hormigon?enrichId=rgreq-e835ee31049925edb2d56b7dad4669c7-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMxMjg5ODYyMztBUzo0NTQ1MzUyNjIwMTk1ODRAMTQ4NTM4MTA1OT](https://www.researchgate.net/publication/312898623_Evaluacion_del_uso_de_altos_volumenes_de_cenizas_volantes_en_el_hormigon?enrichId=rgreq-e835ee31049925edb2d56b7dad4669c7-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdlOzMxMjg5ODYyMztBUzo0NTQ1MzUyNjIwMTk1ODRAMTQ4NTM4MTA1OT).
- SÁNCHEZ GUZMÁN, DIEGO. 2001. Tecnología del Concreto y del Mortero. Santafé de Bogotá: Bhandar Editores,. Págs. 214.Vol.5.
- STANISH, K.D., HOOTON, R.D. y THOMAS, M.D., 1997. Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete : A Literature Review. *Prediction of Chloride Penetration in Concrete*, pp. 31.
- STEVEN H. KOSMATKA, BEATRIX KERKHOFF, WILLIAM C. PANARESE, J.T., 2004. *Diseño y Control de Mezclas de Concreto* [en línea]. 1. Skokie, Illinois 60077-1083 EE.UU.: PORTLAND CEMENT ASSOCIATION. ISBN 0-89312-233-5. Disponible en: [www.cement.org](http://www.cement.org).
- SUDHA, U., VINITA, V., P, G.R., D., R., KALPANA, K., R, P., M, P., R, R., MUDALI, U.K. y AMARENDRA, G., 2018. Enhancement of strength and durability of fly ash concrete in seawater environments : Synergistic effect of nanoparticles. *Construction and Building Materials* [en línea], vol. 187, pp. 448-459. ISSN 0950-0618. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2018.07.214. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.214>.

- TOMÁS, V.K., 2015. *Permeabilidad a Cloruros en Hormigones Marítimos Evaluación CoMParativa de Métodos Nordtest NT BUILD 492 y ASTM C 1202* [en línea]. S.l.: Universidad de Chile. Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/137715/Permeabilidad-a-cloruros-en-hormigones-maritimos-evaluacion-coMParativa-de-metodos-Nordtest.pdf?sequence=1>.
- VALENCIA, S. y ELENA, L., 2001. Caracterización física química y mineralógica de las cenizas volantes. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina* [en línea], vol. 10, pp. 47-62. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=91101007>.
- VALLE, M.A. del, PÉREZ LÓPEZ TEZOZÓMOC y MADRID, M.M., 2001. El fenómeno de la corrosión en estructuras de concreto reforzado. *Secretaría de comunicaciones y transportes instituto mexicano del transporte* [en línea], no. 182, pp. 75. ISSN 0188-7297. DOI 0188-7297. Disponible en: <https://www.imt.mx/archivos/Publicaciones/PublicacionTecnica/pt182.pdf>.
- WANG, J.J., WANG, Y.F., SUN, Y.W., TINGLEY, D.D. y ZHANG, Y.R., 2017. Life cycle sustainability assessment of fly ash concrete structures. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [en línea], vol. 80, no. May, pp. 1162-1174. ISSN 18790690. DOI 10.1016/j.rser.2017.05.232. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.232>.

## ANEXOS 1

### REGISTRO FOTOGRÁFICO

#### Fabricación de muestras de mortero. Cilindro de 4" de diámetro.

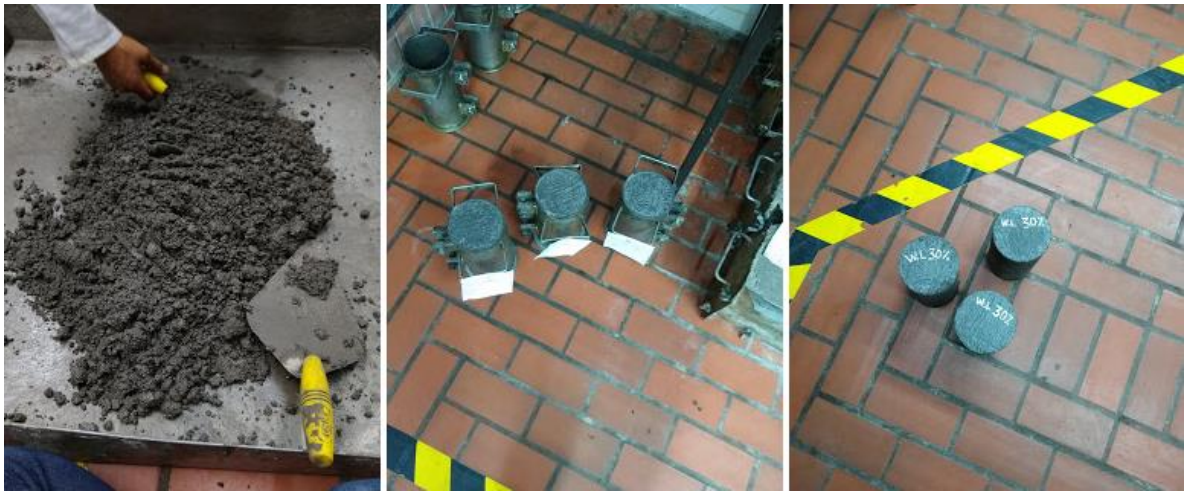
*Ilustración 1 Materiales para fabricación de muestras de mortero*



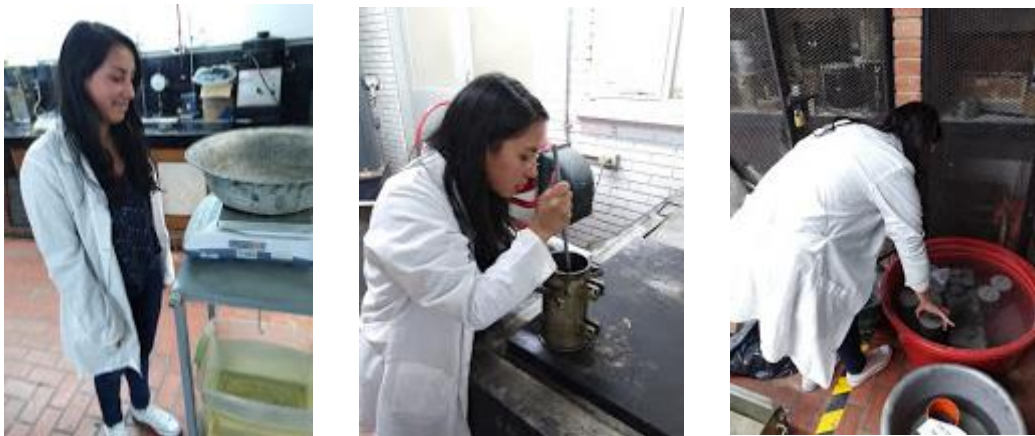
Fuente: Elaboración propia



*Ilustración 2 Fabricación de cilindro de mortero*



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

## Ensayo de Resistencia a la compresión y Modulo de Elasticidad

*Ilustración 3 Resistencia a la compresión y Modulo de elasticidad*



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

## Ensayo de Porosidad y Vacíos

*Ilustración 4 Ensayo Porosidad y Vacíos. Muestra saturada*



Fuente: Elaboración propia

*Ilustración 5 Ensayo Porosidad y Vacíos. Muestra sumergida*



Fuente: Elaboración propia



*Ilustración 6 Ensayo Porosidad y Vacíos. Muestra seca*



Fuente: Elaboración propia

## Ensayo de NT Build 492

*Ilustración 7 Ensayo NT Build 492*



Fuente: Elaboración propia

*Ilustración 8 Penetración ion Cloruro*



Fuente: Elaboración propia

## Ensayo de Sortividad

*Ilustración 9 Ensayo Sortividad*



Fuente: Elaboración propia





Fuente: Elaboración propia

## ANEXO 2

Cálculo de resistencia a la compresión y módulo de elasticidad para la muestra # 1 de cubos de mortero con el porcentaje del 0% de adición de ceniza volante.

*Anexo 1 Resistencia a la compresión 0% Muestra 1. Parte a*

| Ensayo 0% Muestra #1 |         |         |             |          |
|----------------------|---------|---------|-------------|----------|
| Desplazam            | Carga   | Tiempo  | Deformación | Esfuerzo |
| mm                   | kN      | seg     |             | MPa      |
| 0,0255               | 2,3814  | 2,0800  | 0,0001      | 0,9526   |
| 0,0480               | 3,8602  | 3,0800  | 0,0001      | 1,5441   |
| 0,0701               | 5,8992  | 4,0800  | 0,0001      | 2,3597   |
| 0,0919               | 7,9080  | 5,0800  | 0,0002      | 3,1632   |
| 0,1139               | 10,1431 | 6,0800  | 0,0002      | 4,0572   |
| 0,1351               | 12,3795 | 7,0800  | 0,0003      | 4,9518   |
| 0,1570               | 14,7889 | 8,0800  | 0,0003      | 5,9156   |
| 0,1785               | 17,2685 | 9,0800  | 0,0004      | 6,9074   |
| 0,2004               | 19,8960 | 10,0800 | 0,0004      | 7,9584   |
| 0,2221               | 22,6052 | 11,0800 | 0,0004      | 9,0421   |
| 0,2434               | 25,2626 | 12,0800 | 0,0005      | 10,1050  |
| 0,2650               | 28,0739 | 13,0800 | 0,0005      | 11,2296  |
| 0,2864               | 30,8347 | 14,0800 | 0,0006      | 12,3339  |
| 0,3086               | 33,8092 | 15,0800 | 0,0006      | 13,5237  |
| 0,3297               | 36,5634 | 16,0800 | 0,0007      | 14,6254  |
| 0,3519               | 39,4702 | 17,0800 | 0,0007      | 15,7881  |
| 0,3736               | 42,1840 | 18,0800 | 0,0007      | 16,8736  |
| 0,3953               | 44,7104 | 19,0800 | 0,0008      | 17,8842  |
| 0,4172               | 47,1938 | 20,0800 | 0,0008      | 18,8775  |
| 0,4382               | 49,3790 | 21,0800 | 0,0009      | 19,7516  |
| 0,4598               | 51,5074 | 22,0800 | 0,0009      | 20,6030  |
| 0,4822               | 53,5963 | 23,0800 | 0,0010      | 21,4385  |
| 0,5038               | 55,2038 | 24,0800 | 0,0010      | 22,0815  |
| 0,5258               | 56,6074 | 25,0800 | 0,0011      | 22,6429  |
| 0,5469               | 57,5089 | 26,0800 | 0,0011      | 23,0036  |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 2 Resistencia a la compresión 0% Muestra 1. Parte b

|               |                |                |               |                |
|---------------|----------------|----------------|---------------|----------------|
| 0,5469        | 57,5089        | 26,0800        | 0,0011        | 23,0036        |
| 0,5685        | 58,2021        | 27,0800        | 0,0011        | 23,2808        |
| 0,5902        | 58,5205        | 28,0800        | 0,0012        | 23,4082        |
| <b>0,6123</b> | <b>58,6320</b> | <b>29,0800</b> | <b>0,0012</b> | <b>23,4528</b> |
| 0,6341        | 58,2552        | 30,0800        | 0,0013        | 23,3021        |
| 0,6553        | 57,6358        | 31,0800        | 0,0013        | 23,0543        |
| 0,6773        | 57,0523        | 32,0800        | 0,0014        | 22,8209        |
| 0,6984        | 56,1479        | 33,0800        | 0,0014        | 22,4592        |
| 0,7207        | 55,4092        | 34,0800        | 0,0014        | 22,1637        |
| 0,7418        | 54,4332        | 35,0800        | 0,0015        | 21,7733        |
| 0,7642        | 53,5777        | 36,0800        | 0,0015        | 21,4311        |
| 0,7858        | 52,5771        | 37,0800        | 0,0016        | 21,0308        |
| 0,8072        | 51,5364        | 38,0800        | 0,0016        | 20,6146        |
| 0,8293        | 50,5532        | 39,0800        | 0,0017        | 20,2213        |
| 0,8502        | 49,3661        | 40,0800        | 0,0017        | 19,7465        |
| 0,8719        | 48,3351        | 41,0800        | 0,0017        | 19,3340        |
| 0,8942        | 47,4561        | 42,0800        | 0,0018        | 18,9824        |
| 0,9160        | 46,4524        | 43,0800        | 0,0018        | 18,5809        |
| 0,9376        | 45,4233        | 44,0800        | 0,0019        | 18,1693        |
| 0,9587        | 44,2355        | 45,0800        | 0,0019        | 17,6942        |
| 0,9804        | 43,1160        | 46,0800        | 0,0020        | 17,2464        |
| 1,0021        | 42,0784        | 47,0800        | 0,0020        | 16,8314        |

Fuente: Elaboración propia



Anexo 3 Resistencia a la compresión 0% Muestra 2. Parte a

| Ensayo 0% Muestra #2 |        |        |             |          |
|----------------------|--------|--------|-------------|----------|
| Desplazam            | Carga  | Tiempo | Deformación | Esfuerzo |
| mm                   | kN     | seg    |             | MPa      |
| 0,021                | 0,233  | 1,810  | 0,000       | 0,093    |
| 0,043                | 0,314  | 2,810  | 0,000       | 0,126    |
| 0,065                | 0,471  | 3,810  | 0,000       | 0,188    |
| 0,087                | 0,685  | 4,810  | 0,000       | 0,274    |
| 0,108                | 0,945  | 5,810  | 0,000       | 0,378    |
| 0,130                | 1,260  | 6,810  | 0,000       | 0,504    |
| 0,152                | 1,794  | 7,810  | 0,000       | 0,718    |
| 0,173                | 2,554  | 8,810  | 0,000       | 1,022    |
| 0,195                | 3,441  | 9,810  | 0,000       | 1,377    |
| 0,217                | 4,486  | 10,810 | 0,000       | 1,795    |
| 0,239                | 5,795  | 11,810 | 0,000       | 2,318    |
| 0,260                | 7,198  | 12,810 | 0,001       | 2,879    |
| 0,282                | 8,877  | 13,810 | 0,001       | 3,551    |
| 0,303                | 10,749 | 14,810 | 0,001       | 4,300    |
| 0,325                | 12,789 | 15,810 | 0,001       | 5,116    |
| 0,347                | 15,170 | 16,810 | 0,001       | 6,068    |
| 0,368                | 17,544 | 17,810 | 0,001       | 7,017    |
| 0,390                | 20,199 | 18,810 | 0,001       | 8,080    |
| 0,411                | 22,642 | 19,810 | 0,001       | 9,057    |
| 0,433                | 25,496 | 20,810 | 0,001       | 10,198   |
| 0,455                | 28,348 | 21,810 | 0,001       | 11,339   |
| 0,476                | 31,213 | 22,810 | 0,001       | 12,485   |
| 0,499                | 34,276 | 23,810 | 0,001       | 13,711   |
| 0,520                | 37,037 | 24,810 | 0,001       | 14,815   |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 4 Resistencia a la compresión 0% Muestra 2. Parte b

|              |               |               |              |               |
|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 0,542        | 39,995        | 25,810        | 0,001        | 15,998        |
| 0,563        | 42,687        | 26,810        | 0,001        | 17,075        |
| 0,584        | 45,335        | 27,810        | 0,001        | 18,134        |
| 0,607        | 48,120        | 28,810        | 0,001        | 19,248        |
| 0,628        | 50,608        | 29,810        | 0,001        | 20,243        |
| 0,650        | 53,140        | 30,810        | 0,001        | 21,256        |
| 0,672        | 55,487        | 31,810        | 0,001        | 22,195        |
| 0,693        | 57,675        | 32,810        | 0,001        | 23,070        |
| 0,715        | 59,661        | 33,810        | 0,001        | 23,865        |
| 0,737        | 61,488        | 34,810        | 0,001        | 24,595        |
| 0,759        | 63,018        | 35,810        | 0,002        | 25,207        |
| 0,780        | 64,080        | 36,810        | 0,002        | 25,632        |
| 0,802        | 64,934        | 37,810        | 0,002        | 25,974        |
| 0,823        | 65,281        | 38,810        | 0,002        | 26,113        |
| <b>0,845</b> | <b>65,560</b> | <b>39,810</b> | <b>0,002</b> | <b>26,224</b> |
| 0,867        | 65,312        | 40,810        | 0,002        | 26,125        |
| 0,889        | 64,509        | 41,810        | 0,002        | 25,803        |
| 0,911        | 63,264        | 42,810        | 0,002        | 25,306        |
| 0,932        | 61,819        | 43,810        | 0,002        | 24,728        |
| 0,954        | 60,787        | 44,810        | 0,002        | 24,315        |
| 0,975        | 59,738        | 45,810        | 0,002        | 23,895        |
| 0,997        | 58,680        | 46,810        | 0,002        | 23,472        |
| 1,019        | 57,795        | 47,810        | 0,002        | 23,118        |
| 1,040        | 56,641        | 48,810        | 0,002        | 22,657        |
| 1,062        | 55,600        | 49,810        | 0,002        | 22,240        |
| 1,084        | 54,423        | 50,810        | 0,002        | 21,769        |
| 1,105        | 53,398        | 51,810        | 0,002        | 21,359        |
| 1,127        | 52,188        | 52,810        | 0,002        | 20,875        |
| 1,149        | 51,008        | 53,810        | 0,002        | 20,403        |
| 1,171        | 49,926        | 54,810        | 0,002        | 19,970        |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 5 Resistencia a la compresión 0% Muestra 3. Parte a

| Ensayo 0% Muestra #3 |        |        |             |          |
|----------------------|--------|--------|-------------|----------|
| Desplazam            | Carga  | Tiempo | Deformación | Esfuerzo |
| mm                   | kN     | seg    |             | MPa      |
| 0,023                | 0,710  | 1,940  | 0,000       | 0,284    |
| 0,046                | 1,165  | 2,940  | 0,000       | 0,466    |
| 0,067                | 1,764  | 3,940  | 0,000       | 0,706    |
| 0,089                | 2,538  | 4,940  | 0,000       | 1,015    |
| 0,111                | 3,504  | 5,940  | 0,000       | 1,402    |
| 0,132                | 4,590  | 6,940  | 0,000       | 1,836    |
| 0,154                | 5,912  | 7,940  | 0,000       | 2,365    |
| 0,176                | 7,458  | 8,940  | 0,000       | 2,983    |
| 0,197                | 9,295  | 9,940  | 0,000       | 3,718    |
| 0,219                | 11,351 | 10,940 | 0,000       | 4,540    |
| 0,241                | 13,797 | 11,940 | 0,000       | 5,519    |
| 0,262                | 16,454 | 12,940 | 0,001       | 6,582    |
| 0,284                | 19,369 | 13,940 | 0,001       | 7,748    |
| 0,306                | 22,341 | 14,940 | 0,001       | 8,936    |
| 0,327                | 25,545 | 15,940 | 0,001       | 10,218   |
| 0,349                | 29,124 | 16,940 | 0,001       | 11,650   |
| 0,371                | 32,576 | 17,940 | 0,001       | 13,030   |
| 0,392                | 36,128 | 18,940 | 0,001       | 14,451   |
| 0,414                | 39,694 | 19,940 | 0,001       | 15,878   |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 6 Resistencia a la compresión 0% Muestra 3. Parte b

|              |               |               |              |               |
|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 0,435        | 43,120        | 20,940        | 0,001        | 17,248        |
| 0,457        | 46,687        | 21,940        | 0,001        | 18,675        |
| 0,479        | 50,202        | 22,940        | 0,001        | 20,081        |
| 0,501        | 53,537        | 23,940        | 0,001        | 21,415        |
| 0,523        | 56,731        | 24,940        | 0,001        | 22,692        |
| 0,544        | 59,630        | 25,940        | 0,001        | 23,852        |
| 0,565        | 62,393        | 26,940        | 0,001        | 24,957        |
| 0,587        | 64,870        | 27,940        | 0,001        | 25,948        |
| 0,609        | 67,022        | 28,940        | 0,001        | 26,809        |
| 0,630        | 68,480        | 29,940        | 0,001        | 27,392        |
| 0,652        | 69,545        | 30,940        | 0,001        | 27,818        |
| <b>0,675</b> | <b>69,974</b> | <b>31,940</b> | <b>0,001</b> | <b>27,990</b> |
| 0,695        | 69,776        | 32,940        | 0,001        | 27,910        |
| 0,717        | 69,496        | 33,940        | 0,001        | 27,798        |
| 0,739        | 68,664        | 34,940        | 0,001        | 27,465        |
| 0,762        | 67,866        | 35,940        | 0,002        | 27,147        |
| 0,783        | 66,803        | 36,940        | 0,002        | 26,721        |
| 0,804        | 65,830        | 37,940        | 0,002        | 26,332        |
| 0,826        | 64,635        | 38,940        | 0,002        | 25,854        |
| 0,847        | 63,242        | 39,940        | 0,002        | 25,297        |
| 0,869        | 61,886        | 40,940        | 0,002        | 24,754        |
| 0,891        | 60,563        | 41,940        | 0,002        | 24,225        |
| 0,913        | 59,080        | 42,940        | 0,002        | 23,632        |
| 0,935        | 57,568        | 43,940        | 0,002        | 23,027        |
| 0,956        | 56,085        | 44,940        | 0,002        | 22,434        |
| 0,977        | 54,884        | 45,940        | 0,002        | 21,954        |
| 0,999        | 53,739        | 46,940        | 0,002        | 21,496        |
| 1,021        | 52,630        | 47,940        | 0,002        | 21,052        |
| 1,043        | 51,303        | 48,940        | 0,002        | 20,521        |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 7 Resistencia a la compresión 10% Muestra 1. Parte a

**Ensayo en Marcha 1. 10%**

| <b>Desplazam</b> | <b>Carga</b> | <b>Tiempo</b> | <b>Deformación</b> | <b>Esfuerzo</b> |
|------------------|--------------|---------------|--------------------|-----------------|
| <b>mm</b>        | <b>kN</b>    | <b>seg</b>    |                    | <b>MPa</b>      |
| 0,021            | 0,233        | 1,810         | 0,000              | 0,093           |
| 0,043            | 0,314        | 2,810         | 0,000              | 0,126           |
| 0,065            | 0,471        | 3,810         | 0,000              | 0,188           |
| 0,087            | 0,685        | 4,810         | 0,000              | 0,274           |
| 0,108            | 0,945        | 5,810         | 0,000              | 0,378           |
| 0,130            | 1,260        | 6,810         | 0,000              | 0,504           |
| 0,152            | 1,794        | 7,810         | 0,000              | 0,718           |
| 0,173            | 2,554        | 8,810         | 0,000              | 1,022           |
| 0,195            | 3,441        | 9,810         | 0,000              | 1,377           |
| 0,217            | 4,486        | 10,810        | 0,000              | 1,795           |
| 0,239            | 5,795        | 11,810        | 0,000              | 2,318           |
| 0,260            | 7,198        | 12,810        | 0,001              | 2,879           |
| 0,282            | 8,877        | 13,810        | 0,001              | 3,551           |
| 0,303            | 10,749       | 14,810        | 0,001              | 4,300           |
| 0,325            | 12,789       | 15,810        | 0,001              | 5,116           |
| 0,347            | 15,170       | 16,810        | 0,001              | 6,068           |
| 0,368            | 17,544       | 17,810        | 0,001              | 7,017           |
| 0,390            | 20,199       | 18,810        | 0,001              | 8,080           |
| 0,411            | 22,642       | 19,810        | 0,001              | 9,057           |
| 0,433            | 25,496       | 20,810        | 0,001              | 10,198          |
| 0,455            | 28,348       | 21,810        | 0,001              | 11,339          |
| 0,476            | 31,213       | 22,810        | 0,001              | 12,485          |
| 0,499            | 34,276       | 23,810        | 0,001              | 13,711          |
| 0,520            | 37,037       | 24,810        | 0,001              | 14,815          |
| 0,542            | 39,995       | 25,810        | 0,001              | 15,998          |

Fuente: Elaboración propia

*Anexo 8 Resistencia a la compresión 10% Muestra 1. Parte b*

|              |               |               |              |               |
|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 0,563        | 42,687        | 26,810        | 0,001        | 17,075        |
| 0,584        | 45,335        | 27,810        | 0,001        | 18,134        |
| 0,607        | 48,120        | 28,810        | 0,001        | 19,248        |
| 0,628        | 50,608        | 29,810        | 0,001        | 20,243        |
| 0,650        | 53,140        | 30,810        | 0,001        | 21,256        |
| 0,672        | 55,487        | 31,810        | 0,001        | 22,195        |
| 0,693        | 57,675        | 32,810        | 0,001        | 23,070        |
| 0,715        | 59,661        | 33,810        | 0,001        | 23,865        |
| 0,737        | 61,488        | 34,810        | 0,001        | 24,595        |
| 0,759        | 63,018        | 35,810        | 0,002        | 25,207        |
| 0,780        | 64,080        | 36,810        | 0,002        | 25,632        |
| 0,802        | 64,934        | 37,810        | 0,002        | 25,974        |
| 0,823        | 65,281        | 38,810        | 0,002        | 26,113        |
| <b>0,845</b> | <b>65,560</b> | <b>39,810</b> | <b>0,002</b> | <b>26,224</b> |
| 0,867        | 65,312        | 40,810        | 0,002        | 26,125        |
| 0,889        | 64,509        | 41,810        | 0,002        | 25,803        |
| 0,911        | 63,264        | 42,810        | 0,002        | 25,306        |
| 0,932        | 61,819        | 43,810        | 0,002        | 24,728        |
| 0,954        | 60,787        | 44,810        | 0,002        | 24,315        |
| 0,975        | 59,738        | 45,810        | 0,002        | 23,895        |
| 0,997        | 58,680        | 46,810        | 0,002        | 23,472        |
| 1,019        | 57,795        | 47,810        | 0,002        | 23,118        |
| 1,040        | 56,641        | 48,810        | 0,002        | 22,657        |
| 1,062        | 55,600        | 49,810        | 0,002        | 22,240        |
| 1,084        | 54,423        | 50,810        | 0,002        | 21,769        |
| 1,105        | 53,398        | 51,810        | 0,002        | 21,359        |
| 1,127        | 52,188        | 52,810        | 0,002        | 20,875        |
| 1,149        | 51,008        | 53,810        | 0,002        | 20,403        |
| 1,171        | 49,926        | 54,810        | 0,002        | 19,970        |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 9 Resistencia a la compresión 10% Muestra 2.

**Ensayo en Marcha 2. 10%**

| Desplazam    | Carga         | Tiempo        | Deformación  | Esfuerzo      |
|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| mm           | kN            | seg           |              | MPa           |
| 0,021        | 0,444         | 1,810         | 0,000        | 0,177         |
| 0,043        | 1,084         | 2,810         | 0,000        | 0,434         |
| 0,065        | 1,608         | 3,810         | 0,000        | 0,643         |
| 0,087        | 2,300         | 4,810         | 0,000        | 0,920         |
| 0,108        | 3,564         | 5,810         | 0,000        | 1,426         |
| 0,130        | 5,176         | 6,810         | 0,000        | 2,070         |
| 0,152        | 7,113         | 7,810         | 0,000        | 2,845         |
| 0,173        | 9,280         | 8,810         | 0,000        | 3,712         |
| 0,195        | 11,801        | 9,810         | 0,000        | 4,720         |
| 0,217        | 13,955        | 10,810        | 0,000        | 5,582         |
| 0,238        | 16,918        | 11,810        | 0,000        | 6,767         |
| 0,260        | 20,019        | 12,810        | 0,001        | 8,008         |
| 0,281        | 23,253        | 13,810        | 0,001        | 9,301         |
| 0,303        | 26,688        | 14,810        | 0,001        | 10,675        |
| 0,325        | 30,069        | 15,810        | 0,001        | 12,027        |
| 0,347        | 33,572        | 16,810        | 0,001        | 13,429        |
| 0,368        | 36,875        | 17,810        | 0,001        | 14,750        |
| 0,390        | 40,246        | 18,810        | 0,001        | 16,099        |
| 0,411        | 43,391        | 19,810        | 0,001        | 17,356        |
| 0,433        | 46,382        | 20,810        | 0,001        | 18,553        |
| 0,455        | 49,120        | 21,810        | 0,001        | 19,648        |
| 0,476        | 51,369        | 22,810        | 0,001        | 20,548        |
| 0,499        | 53,248        | 23,810        | 0,001        | 21,299        |
| 0,520        | 54,423        | 24,810        | 0,001        | 21,769        |
| 0,542        | 54,989        | 25,810        | 0,001        | 21,996        |
| <b>0,563</b> | <b>55,139</b> | <b>26,810</b> | <b>0,001</b> | <b>22,056</b> |
| 0,584        | 54,822        | 27,810        | 0,001        | 21,929        |
| 0,607        | 54,653        | 28,810        | 0,001        | 21,861        |
| 0,628        | 53,976        | 29,810        | 0,001        | 21,590        |
| 0,650        | 53,371        | 30,810        | 0,001        | 21,349        |
| 0,672        | 52,579        | 31,810        | 0,001        | 21,032        |
| 0,693        | 51,726        | 32,810        | 0,001        | 20,690        |
| 0,715        | 50,773        | 33,810        | 0,001        | 20,309        |
| 0,737        | 49,848        | 34,810        | 0,001        | 19,939        |
| 0,759        | 48,885        | 35,810        | 0,002        | 19,554        |
| 0,780        | 47,763        | 36,810        | 0,002        | 19,105        |
| 0,802        | 46,801        | 37,810        | 0,002        | 18,721        |
| 0,823        | 45,733        | 38,810        | 0,002        | 18,293        |
| 0,845        | 44,824        | 39,810        | 0,002        | 17,929        |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 10 Resistencia a la compresión 10% Muestra 3.

**Ensayo en Marcha 3. 10%**

| Desplazam    | Carga         | Tiempo        | Deformación  | Esfuerzo      |
|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| mm           | kN            | seg           |              | MPa           |
| 0,021        | 0,243         | 1,810         | 0,000        | 0,097         |
| 0,043        | 0,432         | 2,810         | 0,000        | 0,173         |
| 0,065        | 0,655         | 3,810         | 0,000        | 0,262         |
| 0,087        | 0,974         | 4,810         | 0,000        | 0,390         |
| 0,109        | 1,415         | 5,810         | 0,000        | 0,566         |
| 0,130        | 2,039         | 6,810         | 0,000        | 0,815         |
| 0,152        | 2,876         | 7,810         | 0,000        | 1,150         |
| 0,173        | 3,951         | 8,810         | 0,000        | 1,581         |
| 0,195        | 5,222         | 9,810         | 0,000        | 2,089         |
| 0,217        | 6,825         | 10,810        | 0,000        | 2,730         |
| 0,238        | 8,766         | 11,810        | 0,000        | 3,506         |
| 0,260        | 11,055        | 12,810        | 0,001        | 4,422         |
| 0,281        | 13,528        | 13,810        | 0,001        | 5,411         |
| 0,304        | 16,216        | 14,810        | 0,001        | 6,487         |
| 0,325        | 18,883        | 15,810        | 0,001        | 7,553         |
| 0,347        | 21,905        | 16,810        | 0,001        | 8,762         |
| 0,368        | 25,039        | 17,810        | 0,001        | 10,016        |
| 0,390        | 28,142        | 18,810        | 0,001        | 11,257        |
| 0,412        | 31,448        | 19,810        | 0,001        | 12,579        |
| 0,433        | 34,520        | 20,810        | 0,001        | 13,808        |
| 0,455        | 37,744        | 21,810        | 0,001        | 15,097        |
| 0,476        | 40,926        | 22,810        | 0,001        | 16,370        |
| 0,499        | 43,996        | 23,810        | 0,001        | 17,598        |
| 0,520        | 46,828        | 24,810        | 0,001        | 18,731        |
| 0,541        | 49,379        | 25,810        | 0,001        | 19,752        |
| 0,563        | 51,802        | 26,810        | 0,001        | 20,721        |
| 0,585        | 53,843        | 27,810        | 0,001        | 21,537        |
| 0,607        | 55,660        | 28,810        | 0,001        | 22,264        |
| 0,628        | 56,852        | 29,810        | 0,001        | 22,741        |
| 0,650        | 57,779        | 30,810        | 0,001        | 23,111        |
| 0,672        | 58,371        | 31,810        | 0,001        | 23,349        |
| <b>0,693</b> | <b>58,513</b> | <b>32,810</b> | <b>0,001</b> | <b>23,405</b> |
| 0,715        | 58,504        | 33,810        | 0,001        | 23,402        |
| 0,736        | 58,047        | 34,810        | 0,001        | 23,219        |
| 0,759        | 57,621        | 35,810        | 0,002        | 23,048        |
| 0,780        | 56,873        | 36,810        | 0,002        | 22,749        |
| 0,802        | 56,028        | 37,810        | 0,002        | 22,411        |
| 0,824        | 55,202        | 38,810        | 0,002        | 22,081        |
| 0,845        | 54,259        | 39,810        | 0,002        | 21,704        |

Fuente: Elaboración propia



Anexo 11 Resistencia a la compresión 20% Muestra 1. Parte a

**Ensayo en Marcha 1. 20%**

| <b>Desplazam</b> | <b>Carga</b> | <b>Tiempo</b> | <b>Deformación</b> | <b>Esfuerzo</b> |
|------------------|--------------|---------------|--------------------|-----------------|
| <b>mm</b>        | <b>kN</b>    | <b>seg</b>    |                    | <b>MPa</b>      |
| 0,021            | 0,006        | 1,810         | 0,000              | 0,003           |
| 0,043            | 0,006        | 2,810         | 0,000              | 0,003           |
| 0,065            | 0,006        | 3,810         | 0,000              | 0,002           |
| 0,087            | 0,007        | 4,810         | 0,000              | 0,003           |
| 0,109            | 0,008        | 5,810         | 0,000              | 0,003           |
| 0,130            | 0,012        | 6,810         | 0,000              | 0,005           |
| 0,152            | 0,020        | 7,810         | 0,000              | 0,008           |
| 0,174            | 0,023        | 8,810         | 0,000              | 0,009           |
| 0,195            | 0,038        | 9,810         | 0,000              | 0,015           |
| 0,217            | 0,040        | 10,810        | 0,000              | 0,016           |
| 0,238            | 0,044        | 11,810        | 0,000              | 0,018           |
| 0,260            | 0,049        | 12,810        | 0,001              | 0,020           |
| 0,282            | 0,067        | 13,810        | 0,001              | 0,027           |
| 0,303            | 0,089        | 14,810        | 0,001              | 0,035           |
| 0,325            | 0,128        | 15,810        | 0,001              | 0,051           |
| 0,347            | 0,178        | 16,810        | 0,001              | 0,071           |
| 0,369            | 0,158        | 17,810        | 0,001              | 0,063           |
| 0,390            | 0,166        | 18,810        | 0,001              | 0,067           |
| 0,412            | 0,312        | 19,810        | 0,001              | 0,125           |
| 0,433            | 0,483        | 20,810        | 0,001              | 0,193           |
| 0,455            | 0,765        | 21,810        | 0,001              | 0,306           |
| 0,477            | 0,975        | 22,810        | 0,001              | 0,390           |
| 0,498            | 1,193        | 23,810        | 0,001              | 0,477           |
| 0,520            | 1,486        | 24,810        | 0,001              | 0,595           |
| 0,542            | 1,854        | 25,810        | 0,001              | 0,742           |
| 0,564            | 2,393        | 26,810        | 0,001              | 0,957           |
| 0,585            | 3,134        | 27,810        | 0,001              | 1,254           |
| 0,607            | 4,061        | 28,810        | 0,001              | 1,624           |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 12 Resistencia a la compresión 20% Muestra 1. Parte b

|              |               |               |              |               |
|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 0,628        | 5,333         | 29,810        | 0,001        | 2,133         |
| 0,650        | 6,885         | 30,810        | 0,001        | 2,754         |
| 0,672        | 8,764         | 31,810        | 0,001        | 3,506         |
| 0,693        | 10,779        | 32,810        | 0,001        | 4,312         |
| 0,715        | 13,056        | 33,810        | 0,001        | 5,222         |
| 0,737        | 15,496        | 34,810        | 0,001        | 6,198         |
| 0,758        | 17,970        | 35,810        | 0,002        | 7,188         |
| 0,780        | 20,732        | 36,810        | 0,002        | 8,293         |
| 0,801        | 23,249        | 37,810        | 0,002        | 9,300         |
| 0,823        | 26,095        | 38,810        | 0,002        | 10,438        |
| 0,845        | 28,907        | 39,810        | 0,002        | 11,563        |
| 0,867        | 31,660        | 40,810        | 0,002        | 12,664        |
| 0,888        | 34,258        | 41,810        | 0,002        | 13,703        |
| 0,910        | 36,695        | 42,810        | 0,002        | 14,678        |
| 0,931        | 39,063        | 43,810        | 0,002        | 15,625        |
| 0,953        | 41,189        | 44,810        | 0,002        | 16,476        |
| 0,975        | 43,116        | 45,810        | 0,002        | 17,246        |
| 0,997        | 44,527        | 46,810        | 0,002        | 17,811        |
| 1,019        | 45,741        | 47,810        | 0,002        | 18,296        |
| 1,040        | 46,511        | 48,810        | 0,002        | 18,604        |
| 1,062        | 46,839        | 49,810        | 0,002        | 18,736        |
| <b>1,084</b> | <b>47,046</b> | <b>50,810</b> | <b>0,002</b> | <b>18,818</b> |
| 1,105        | 46,851        | 51,810        | 0,002        | 18,741        |
| 1,127        | 46,705        | 52,810        | 0,002        | 18,682        |
| 1,149        | 46,307        | 53,810        | 0,002        | 18,523        |
| 1,170        | 45,738        | 54,810        | 0,002        | 18,295        |
| 1,192        | 45,181        | 55,810        | 0,002        | 18,072        |
| 1,213        | 44,462        | 56,810        | 0,002        | 17,785        |
| 1,235        | 43,898        | 57,810        | 0,002        | 17,559        |
| 1,257        | 43,410        | 58,810        | 0,003        | 17,364        |
| 1,279        | 42,812        | 59,810        | 0,003        | 17,125        |
| 1,300        | 42,157        | 60,810        | 0,003        | 16,863        |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 13 Resistencia a la compresión 20% Muestra 2. Parte a

**Ensayo en Marcha 2. 20%**

| <b>Desplazam</b> | <b>Carga</b> | <b>Tiempo</b> | <b>Deformación</b> | <b>Esfuerzo</b> |
|------------------|--------------|---------------|--------------------|-----------------|
| <b>mm</b>        | <b>kN</b>    | <b>seg</b>    |                    | <b>MPa</b>      |
| 0,021            | 0,021        | 1,820         | 0,000              | 0,008           |
| 0,043            | 0,035        | 2,820         | 0,000              | 0,014           |
| 0,065            | 0,051        | 3,820         | 0,000              | 0,021           |
| 0,087            | 0,056        | 4,820         | 0,000              | 0,023           |
| 0,109            | 0,080        | 5,820         | 0,000              | 0,032           |
| 0,130            | 0,102        | 6,820         | 0,000              | 0,041           |
| 0,152            | 0,127        | 7,820         | 0,000              | 0,051           |
| 0,174            | 0,154        | 8,820         | 0,000              | 0,061           |
| 0,195            | 0,157        | 9,820         | 0,000              | 0,063           |
| 0,217            | 0,175        | 10,820        | 0,000              | 0,070           |
| 0,238            | 0,202        | 11,820        | 0,000              | 0,081           |
| 0,260            | 0,223        | 12,820        | 0,001              | 0,089           |
| 0,282            | 0,264        | 13,820        | 0,001              | 0,106           |
| 0,304            | 0,324        | 14,820        | 0,001              | 0,130           |
| 0,325            | 0,419        | 15,820        | 0,001              | 0,167           |
| 0,347            | 0,534        | 16,820        | 0,001              | 0,214           |
| 0,369            | 0,712        | 17,820        | 0,001              | 0,285           |
| 0,391            | 0,977        | 18,820        | 0,001              | 0,391           |
| 0,412            | 1,340        | 19,820        | 0,001              | 0,536           |
| 0,434            | 1,850        | 20,820        | 0,001              | 0,740           |
| 0,455            | 2,476        | 21,820        | 0,001              | 0,991           |
| 0,477            | 3,259        | 22,820        | 0,001              | 1,304           |
| 0,498            | 4,166        | 23,820        | 0,001              | 1,666           |
| 0,521            | 5,397        | 24,820        | 0,001              | 2,159           |
| 0,542            | 6,826        | 25,820        | 0,001              | 2,730           |
| 0,563            | 8,596        | 26,820        | 0,001              | 3,438           |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 14 Resistencia a la compresión 20% Muestra 2. Parte b

|              |               |               |              |               |
|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 0,585        | 10,573        | 27,820        | 0,001        | 4,229         |
| 0,606        | 12,668        | 28,820        | 0,001        | 5,067         |
| 0,628        | 15,004        | 29,820        | 0,001        | 6,001         |
| 0,650        | 17,482        | 30,820        | 0,001        | 6,993         |
| 0,672        | 20,210        | 31,820        | 0,001        | 8,084         |
| 0,693        | 22,917        | 32,820        | 0,001        | 9,167         |
| 0,715        | 25,707        | 33,820        | 0,001        | 10,283        |
| 0,737        | 28,494        | 34,820        | 0,001        | 11,398        |
| 0,758        | 31,164        | 35,820        | 0,002        | 12,466        |
| 0,780        | 34,035        | 36,820        | 0,002        | 13,614        |
| 0,802        | 36,588        | 37,820        | 0,002        | 14,635        |
| 0,824        | 39,080        | 38,820        | 0,002        | 15,632        |
| 0,845        | 41,426        | 39,820        | 0,002        | 16,570        |
| 0,866        | 43,547        | 40,820        | 0,002        | 17,419        |
| 0,888        | 45,501        | 41,820        | 0,002        | 18,200        |
| 0,910        | 47,076        | 42,820        | 0,002        | 18,830        |
| 0,932        | 48,573        | 43,820        | 0,002        | 19,429        |
| 0,954        | 49,554        | 44,820        | 0,002        | 19,821        |
| 0,975        | 50,416        | 45,820        | 0,002        | 20,166        |
| 0,997        | 50,869        | 46,820        | 0,002        | 20,348        |
| 1,018        | 51,082        | 47,820        | 0,002        | 20,433        |
| <b>1,040</b> | <b>51,156</b> | <b>48,820</b> | <b>0,002</b> | <b>20,462</b> |
| 1,062        | 50,930        | 49,820        | 0,002        | 20,372        |
| 1,084        | 50,596        | 50,820        | 0,002        | 20,238        |
| 1,105        | 49,935        | 51,820        | 0,002        | 19,974        |
| 1,127        | 49,247        | 52,820        | 0,002        | 19,699        |
| 1,149        | 48,615        | 53,820        | 0,002        | 19,446        |
| 1,170        | 47,845        | 54,820        | 0,002        | 19,138        |
| 1,192        | 47,366        | 55,820        | 0,002        | 18,947        |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 15 Resistencia a la compresión 20% Muestra 3. Parte a

**Ensayo en Marcha 3. 20%**

| <b>Desplazam</b> | <b>Carga</b> | <b>Tiempo</b> | <b>Deformación</b> | <b>Esfuerzo</b> |
|------------------|--------------|---------------|--------------------|-----------------|
| <b>mm</b>        | <b>kN</b>    | <b>seg</b>    |                    | <b>MPa</b>      |
| 0,021            | 0,034        | 1,810         | 0,000              | 0,014           |
| 0,043            | 0,061        | 2,810         | 0,000              | 0,024           |
| 0,065            | 0,102        | 3,810         | 0,000              | 0,041           |
| 0,087            | 0,178        | 4,810         | 0,000              | 0,071           |
| 0,108            | 0,250        | 5,810         | 0,000              | 0,100           |
| 0,130            | 0,344        | 6,810         | 0,000              | 0,138           |
| 0,152            | 0,493        | 7,810         | 0,000              | 0,197           |
| 0,173            | 0,621        | 8,810         | 0,000              | 0,248           |
| 0,195            | 0,796        | 9,810         | 0,000              | 0,319           |
| 0,216            | 0,952        | 10,810        | 0,000              | 0,381           |
| 0,238            | 1,094        | 11,810        | 0,000              | 0,437           |
| 0,260            | 1,267        | 12,810        | 0,001              | 0,507           |
| 0,282            | 1,446        | 13,810        | 0,001              | 0,578           |
| 0,304            | 1,553        | 14,810        | 0,001              | 0,621           |
| 0,325            | 1,483        | 15,810        | 0,001              | 0,593           |
| 0,347            | 1,573        | 16,810        | 0,001              | 0,629           |
| 0,369            | 1,701        | 17,810        | 0,001              | 0,681           |
| 0,390            | 1,818        | 18,810        | 0,001              | 0,727           |
| 0,412            | 1,996        | 19,810        | 0,001              | 0,798           |
| 0,433            | 2,125        | 20,810        | 0,001              | 0,850           |
| 0,455            | 2,358        | 21,810        | 0,001              | 0,943           |
| 0,477            | 2,659        | 22,810        | 0,001              | 1,063           |
| 0,499            | 3,002        | 23,810        | 0,001              | 1,201           |
| 0,520            | 3,500        | 24,810        | 0,001              | 1,400           |
| 0,542            | 4,186        | 25,810        | 0,001              | 1,675           |
| 0,564            | 5,140        | 26,810        | 0,001              | 2,056           |
| 0,585            | 6,314        | 27,810        | 0,001              | 2,526           |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 16 Resistencia a la compresión 20% Muestra 3. Parte b

|              |               |               |              |               |
|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 0,607        | 7,904         | 28,810        | 0,001        | 3,162         |
| 0,628        | 9,581         | 29,810        | 0,001        | 3,832         |
| 0,650        | 11,552        | 30,810        | 0,001        | 4,621         |
| 0,671        | 13,579        | 31,810        | 0,001        | 5,432         |
| 0,694        | 15,794        | 32,810        | 0,001        | 6,318         |
| 0,715        | 18,024        | 33,810        | 0,001        | 7,210         |
| 0,736        | 19,685        | 34,810        | 0,001        | 7,874         |
| 0,758        | 22,103        | 35,810        | 0,002        | 8,841         |
| 0,780        | 24,634        | 36,810        | 0,002        | 9,854         |
| 0,801        | 27,206        | 37,810        | 0,002        | 10,882        |
| 0,823        | 29,725        | 38,810        | 0,002        | 11,890        |
| 0,845        | 32,354        | 39,810        | 0,002        | 12,942        |
| 0,867        | 34,872        | 40,810        | 0,002        | 13,949        |
| 0,888        | 37,226        | 41,810        | 0,002        | 14,891        |
| 0,910        | 39,573        | 42,810        | 0,002        | 15,829        |
| 0,931        | 41,556        | 43,810        | 0,002        | 16,623        |
| 0,954        | 43,647        | 44,810        | 0,002        | 17,459        |
| 0,975        | 45,301        | 45,810        | 0,002        | 18,120        |
| 0,997        | 46,765        | 46,810        | 0,002        | 18,706        |
| 1,018        | 47,888        | 47,810        | 0,002        | 19,155        |
| 1,040        | 48,666        | 48,810        | 0,002        | 19,466        |
| 1,062        | 49,224        | 49,810        | 0,002        | 19,690        |
| 1,084        | 49,482        | 50,810        | 0,002        | 19,793        |
| <b>1,106</b> | <b>49,480</b> | <b>51,810</b> | <b>0,002</b> | <b>19,792</b> |
| 1,127        | 49,291        | 52,810        | 0,002        | 19,716        |
| 1,148        | 48,856        | 53,810        | 0,002        | 19,542        |
| 1,170        | 48,401        | 54,810        | 0,002        | 19,361        |
| 1,192        | 47,894        | 55,810        | 0,002        | 19,158        |
| 1,213        | 47,361        | 56,810        | 0,002        | 18,944        |
| 1,235        | 46,702        | 57,810        | 0,002        | 18,681        |
| 1,257        | 46,230        | 58,810        | 0,003        | 18,492        |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 17 Resistencia a la compresión 30% Muestra 1. Parte a

**Ensayo en Marcha 1. 30%**

| <b>Desplazam</b> | <b>Carga</b> | <b>Tiempo</b> | <b>Deformación</b> | <b>Esfuerzo</b> |
|------------------|--------------|---------------|--------------------|-----------------|
| <b>mm</b>        | <b>kN</b>    | <b>seg</b>    |                    | <b>MPa</b>      |
| 0,021            | 0,004        | 1,810         | 0,000              | 0,002           |
| 0,043            | 0,002        | 2,810         | 0,000              | 0,001           |
| 0,065            | 0,008        | 3,810         | 0,000              | 0,003           |
| 0,087            | 0,019        | 4,810         | 0,000              | 0,007           |
| 0,108            | 0,035        | 5,810         | 0,000              | 0,014           |
| 0,130            | 0,044        | 6,810         | 0,000              | 0,018           |
| 0,152            | 0,066        | 7,810         | 0,000              | 0,026           |
| 0,174            | 0,088        | 8,810         | 0,000              | 0,035           |
| 0,195            | 0,128        | 9,810         | 0,000              | 0,051           |
| 0,217            | 0,168        | 10,810        | 0,000              | 0,067           |
| 0,239            | 0,207        | 11,810        | 0,000              | 0,083           |
| 0,260            | 0,234        | 12,810        | 0,001              | 0,094           |
| 0,282            | 0,281        | 13,810        | 0,001              | 0,113           |
| 0,304            | 0,337        | 14,810        | 0,001              | 0,135           |
| 0,325            | 0,427        | 15,810        | 0,001              | 0,171           |
| 0,347            | 0,562        | 16,810        | 0,001              | 0,225           |
| 0,368            | 0,752        | 17,810        | 0,001              | 0,301           |
| 0,390            | 1,123        | 18,810        | 0,001              | 0,449           |
| 0,412            | 1,657        | 19,810        | 0,001              | 0,663           |
| 0,433            | 2,458        | 20,810        | 0,001              | 0,983           |
| 0,455            | 3,693        | 21,810        | 0,001              | 1,477           |
| 0,477            | 5,266        | 22,810        | 0,001              | 2,106           |
| 0,499            | 7,246        | 23,810        | 0,001              | 2,899           |
| 0,519            | 9,307        | 24,810        | 0,001              | 3,723           |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 18 Resistencia a la compresión 30% Muestra 1. Parte b

|              |               |               |              |               |
|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 0,542        | 11,713        | 25,810        | 0,001        | 4,685         |
| 0,563        | 14,204        | 26,810        | 0,001        | 5,682         |
| 0,585        | 16,913        | 27,810        | 0,001        | 6,765         |
| 0,607        | 19,620        | 28,810        | 0,001        | 7,848         |
| 0,628        | 22,343        | 29,810        | 0,001        | 8,937         |
| 0,650        | 24,968        | 30,810        | 0,001        | 9,987         |
| 0,671        | 27,569        | 31,810        | 0,001        | 11,027        |
| 0,693        | 29,953        | 32,810        | 0,001        | 11,981        |
| 0,715        | 31,822        | 33,810        | 0,001        | 12,729        |
| 0,737        | 33,311        | 34,810        | 0,001        | 13,324        |
| 0,758        | 34,396        | 35,810        | 0,002        | 13,758        |
| 0,780        | 35,099        | 36,810        | 0,002        | 14,039        |
| 0,802        | 35,702        | 37,810        | 0,002        | 14,281        |
| 0,823        | 35,941        | 38,810        | 0,002        | 14,376        |
| 0,845        | 36,239        | 39,810        | 0,002        | 14,496        |
| 0,867        | 36,365        | 40,810        | 0,002        | 14,546        |
| 0,888        | 36,399        | 41,810        | 0,002        | 14,560        |
| <b>0,910</b> | <b>36,462</b> | <b>42,810</b> | <b>0,002</b> | <b>14,585</b> |
| 0,931        | 36,291        | 43,810        | 0,002        | 14,516        |
| 0,953        | 36,202        | 44,810        | 0,002        | 14,481        |
| 0,975        | 36,078        | 45,810        | 0,002        | 14,431        |
| 0,997        | 35,857        | 46,810        | 0,002        | 14,343        |
| 1,019        | 35,553        | 47,810        | 0,002        | 14,221        |
| 1,040        | 35,214        | 48,810        | 0,002        | 14,085        |
| 1,062        | 34,850        | 49,810        | 0,002        | 13,940        |
| 1,084        | 34,427        | 50,810        | 0,002        | 13,771        |
| 1,106        | 34,013        | 51,810        | 0,002        | 13,605        |
| 1,127        | 33,380        | 52,810        | 0,002        | 13,352        |
| 1,149        | 32,898        | 53,810        | 0,002        | 13,159        |
| 1,170        | 32,410        | 54,810        | 0,002        | 12,964        |

Fuente: Elaboración propia



Anexo 19 Resistencia a la compresión 30% Muestra 2. Parte a

**Ensayo en Marcha 2. 30%**

| <b>Desplazam</b> | <b>Carga</b> | <b>Tiempo</b> | <b>Deformación</b> | <b>Esfuerzo</b> |
|------------------|--------------|---------------|--------------------|-----------------|
| <b>mm</b>        | <b>kN</b>    | <b>seg</b>    |                    | <b>MPa</b>      |
| 0,021            | 0,029        | 1,810         | 0,000              | 0,012           |
| 0,044            | 0,045        | 2,810         | 0,000              | 0,018           |
| 0,065            | 0,051        | 3,810         | 0,000              | 0,021           |
| 0,087            | 0,061        | 4,810         | 0,000              | 0,025           |
| 0,108            | 0,067        | 5,810         | 0,000              | 0,027           |
| 0,130            | 0,077        | 6,810         | 0,000              | 0,031           |
| 0,152            | 0,096        | 7,810         | 0,000              | 0,039           |
| 0,173            | 0,087        | 8,810         | 0,000              | 0,035           |
| 0,195            | 0,091        | 9,810         | 0,000              | 0,036           |
| 0,217            | 0,095        | 10,810        | 0,000              | 0,038           |
| 0,238            | 0,119        | 11,810        | 0,000              | 0,048           |
| 0,260            | 0,140        | 12,810        | 0,001              | 0,056           |
| 0,282            | 0,169        | 13,810        | 0,001              | 0,068           |
| 0,304            | 0,201        | 14,810        | 0,001              | 0,080           |
| 0,325            | 0,265        | 15,810        | 0,001              | 0,106           |
| 0,347            | 0,364        | 16,810        | 0,001              | 0,146           |
| 0,369            | 0,464        | 17,810        | 0,001              | 0,185           |
| 0,390            | 0,608        | 18,810        | 0,001              | 0,243           |
| 0,412            | 0,837        | 19,810        | 0,001              | 0,335           |
| 0,434            | 1,025        | 20,810        | 0,001              | 0,410           |
| 0,455            | 1,260        | 21,810        | 0,001              | 0,504           |
| 0,477            | 1,486        | 22,810        | 0,001              | 0,594           |
| 0,498            | 1,728        | 23,810        | 0,001              | 0,691           |
| 0,520            | 2,142        | 24,810        | 0,001              | 0,857           |
| 0,542            | 2,339        | 25,810        | 0,001              | 0,936           |
| 0,564            | 2,895        | 26,810        | 0,001              | 1,158           |
| 0,585            | 3,416        | 27,810        | 0,001              | 1,367           |
| 0,607            | 4,144        | 28,810        | 0,001              | 1,658           |
| 0,628            | 4,916        | 29,810        | 0,001              | 1,966           |
| 0,650            | 5,820        | 30,810        | 0,001              | 2,328           |
| 0,672            | 6,827        | 31,810        | 0,001              | 2,731           |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 20 Resistencia a la compresión 30% Muestra 2. Parte b

|              |               |               |              |               |
|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| 0,693        | 7,924         | 32,810        | 0,001        | 3,170         |
| 0,715        | 9,159         | 33,810        | 0,001        | 3,664         |
| 0,737        | 10,787        | 34,810        | 0,001        | 4,315         |
| 0,758        | 12,458        | 35,810        | 0,002        | 4,983         |
| 0,780        | 14,226        | 36,810        | 0,002        | 5,690         |
| 0,801        | 16,045        | 37,810        | 0,002        | 6,418         |
| 0,824        | 17,999        | 38,810        | 0,002        | 7,199         |
| 0,845        | 19,842        | 39,810        | 0,002        | 7,937         |
| 0,867        | 21,817        | 40,810        | 0,002        | 8,727         |
| 0,888        | 23,591        | 41,810        | 0,002        | 9,436         |
| 0,910        | 25,515        | 42,810        | 0,002        | 10,206        |
| 0,931        | 27,312        | 43,810        | 0,002        | 10,925        |
| 0,953        | 29,010        | 44,810        | 0,002        | 11,604        |
| 0,975        | 30,753        | 45,810        | 0,002        | 12,301        |
| 0,997        | 32,194        | 46,810        | 0,002        | 12,878        |
| 1,019        | 33,685        | 47,810        | 0,002        | 13,474        |
| 1,040        | 34,796        | 48,810        | 0,002        | 13,918        |
| 1,061        | 35,709        | 49,810        | 0,002        | 14,284        |
| 1,083        | 36,482        | 50,810        | 0,002        | 14,593        |
| 1,105        | 36,878        | 51,810        | 0,002        | 14,751        |
| 1,127        | 37,229        | 52,810        | 0,002        | 14,892        |
| 1,149        | 37,403        | 53,810        | 0,002        | 14,961        |
| <b>1,170</b> | <b>37,466</b> | <b>54,810</b> | <b>0,002</b> | <b>14,986</b> |
| 1,192        | 37,399        | 55,810        | 0,002        | 14,960        |
| 1,214        | 37,299        | 56,810        | 0,002        | 14,920        |
| 1,236        | 37,119        | 57,810        | 0,002        | 14,848        |
| 1,257        | 36,771        | 58,810        | 0,003        | 14,708        |
| 1,278        | 36,415        | 59,810        | 0,003        | 14,566        |
| 1,300        | 35,957        | 60,810        | 0,003        | 14,383        |
| 1,322        | 35,646        | 61,810        | 0,003        | 14,259        |
| 1,343        | 35,164        | 62,810        | 0,003        | 14,066        |
| 1,365        | 34,664        | 63,810        | 0,003        | 13,866        |
| 1,387        | 34,213        | 64,810        | 0,003        | 13,685        |
| 1,408        | 33,652        | 65,810        | 0,003        | 13,461        |
| 1,431        | 33,227        | 66,810        | 0,003        | 13,291        |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 21 Resistencia a la compresión 30% Muestra 3.

**Ensayo en Marcha 3. 30%**

| Desplazam    | Carga         | Tiempo        | Deformación  | Esfuerzo      |
|--------------|---------------|---------------|--------------|---------------|
| mm           | kN            | seg           |              | MPa           |
| 0,021        | 0,479         | 1,810         | 0,000        | 0,192         |
| 0,043        | 0,917         | 2,810         | 0,000        | 0,367         |
| 0,065        | 1,367         | 3,810         | 0,000        | 0,547         |
| 0,086        | 1,809         | 4,810         | 0,000        | 0,724         |
| 0,108        | 2,585         | 5,810         | 0,000        | 1,034         |
| 0,130        | 3,417         | 6,810         | 0,000        | 1,367         |
| 0,152        | 4,462         | 7,810         | 0,000        | 1,785         |
| 0,173        | 5,894         | 8,810         | 0,000        | 2,358         |
| 0,195        | 7,422         | 9,810         | 0,000        | 2,969         |
| 0,216        | 9,463         | 10,810        | 0,000        | 3,785         |
| 0,238        | 11,644        | 11,810        | 0,000        | 4,657         |
| 0,260        | 13,939        | 12,810        | 0,001        | 5,575         |
| 0,281        | 16,309        | 13,810        | 0,001        | 6,524         |
| 0,303        | 18,790        | 14,810        | 0,001        | 7,516         |
| 0,325        | 21,140        | 15,810        | 0,001        | 8,456         |
| 0,347        | 23,452        | 16,810        | 0,001        | 9,381         |
| 0,368        | 25,621        | 17,810        | 0,001        | 10,248        |
| 0,389        | 27,380        | 18,810        | 0,001        | 10,952        |
| 0,412        | 29,115        | 19,810        | 0,001        | 11,646        |
| 0,433        | 30,413        | 20,810        | 0,001        | 12,165        |
| 0,455        | 31,572        | 21,810        | 0,001        | 12,629        |
| 0,477        | 32,489        | 22,810        | 0,001        | 12,996        |
| 0,498        | 33,103        | 23,810        | 0,001        | 13,241        |
| 0,520        | 33,619        | 24,810        | 0,001        | 13,448        |
| 0,542        | 33,894        | 25,810        | 0,001        | 13,558        |
| <b>0,564</b> | <b>34,036</b> | <b>26,810</b> | <b>0,001</b> | <b>13,614</b> |
| 0,585        | 33,941        | 27,810        | 0,001        | 13,576        |
| 0,607        | 33,981        | 28,810        | 0,001        | 13,592        |
| 0,628        | 33,901        | 29,810        | 0,001        | 13,560        |
| 0,650        | 33,792        | 30,810        | 0,001        | 13,517        |
| 0,672        | 33,624        | 31,810        | 0,001        | 13,450        |
| 0,693        | 33,251        | 32,810        | 0,001        | 13,301        |
| 0,715        | 33,020        | 33,810        | 0,001        | 13,208        |
| 0,737        | 32,685        | 34,810        | 0,001        | 13,074        |
| 0,759        | 32,299        | 35,810        | 0,002        | 12,920        |

Fuente: Elaboración propia

Anexo 22 Sortividad

| SORTIVIDAD (gr) |     |           |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------------|-----|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Muestra         |     | Peso Seco | 1 Min   | 5 Min   | 10 Min  | 15 Min  | 20 Min  | 25 Min  | 30 Min  | 35 Min  | 40 min  |
| 4               | 0%  | 829,8     | 846,9   | 850,2   | 851,3   | 852,9   | 853,9   | 854,5   | 855,2   | 856     | 856,5   |
| 1               | 10% | 862       | 871,5   | 873,7   | 873,8   | 873,8   | 874,7   | 874,5   | 875     | 875,3   | 875,7   |
| 2               | 10% | 834,4     | 844,9   | 846,3   | 847,3   | 847,9   | 848,2   | 848,6   | 848,9   | 849,2   | 849,4   |
| 3               | 10% | 847,9     | 858,8   | 860,8   | 861     | 861,3   | 861,7   | 862,1   | 862,4   | 862,7   | 862,8   |
| 4               | 10% | 818,6     | 833,2   | 834,8   | 836,8   | 838,5   | 838,5   | 838,8   | 839,3   | 840     | 840,7   |
| Promedio 10%    |     | 840,725   | 852,1   | 853,9   | 854,725 | 855,375 | 855,775 | 856     | 856,4   | 856,8   | 857,15  |
| 1               | 20% | 801,5     | 818,8   | 816,6   | 818,5   | 819,7   | 819,8   | 820,3   | 820,5   | 821     | 821,2   |
| 2               | 20% | 846,1     | 856,3   | 857,9   | 858     | 859,2   | 858,8   | 859,1   | 859,4   | 859,5   | 859,9   |
| 3               | 20% | 812       | 815,5   | 823,2   | 825,3   | 826,2   | 826,2   | 826,4   | 826,7   | 827,1   | 827,5   |
| 4               | 20% | 828,2     | 839,3   | 843,5   | 844,3   | 845     | 845     | 845,7   | 846,1   | 846,3   | 847,1   |
| Promedio 20%    |     | 821,95    | 832,475 | 835,3   | 836,525 | 837,525 | 837,45  | 837,875 | 838,175 | 838,475 | 838,925 |
| 1               | 30% | 829,3     | 844     | 845,1   | 845,7   | 846,1   | 846,3   | 846,6   | 847,1   | 847,3   | 847,6   |
| 2               | 30% | 817,2     | 822,6   | 830,6   | 831,8   | 831,8   | 832,6   | 832,4   | 833,1   | 833,2   | 833,7   |
| 3               | 30% | 829,5     | 835,8   | 840,9   | 845,2   | 845,5   | 845,9   | 846     | 846,6   | 846,6   | 847     |
| 4               | 30% | 789,6     | 806     | 807,9   | 808,2   | 809,1   | 809,8   | 810,2   | 810,8   | 811,2   | 812     |
| Promedio 30%    |     | 816,4     | 827,1   | 831,125 | 832,725 | 833,125 | 833,65  | 833,8   | 834,4   | 834,575 | 835,075 |

| SORTIVIDAD (gr) |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |         |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 45 Min          | 50 Min  | 55 Min  | 60 Min  | 2 Hora  | 1er Día | 2do Día | 3ro Día | 4to Día | 5to Día | 6to Día | 7mo Día |
| 857,3           | 857,6   | 858     | 858,6   | 862,6   | 879,2   |         | 881,3   | 883,4   |         | 886,8   | 889,7   |
| 875,7           | 875,5   | 876,1   | 876,2   | 877,8   | 885,8   |         | 889,2   | 894,5   |         | 897,6   | 902,8   |
| 849,4           | 850     | 850,1   | 850,5   | 851,8   | 859,9   |         | 862,4   | 874,2   |         | 876,8   | 882,4   |
| 863,2           | 863,2   | 863,7   | 863,7   | 865,1   | 872,6   |         | 875,4   | 883,1   |         | 885,6   | 892,8   |
| 840,6           | 840,9   | 842     | 842,3   | 845     | 862     |         | 867,8   | 876,5   |         | 879,8   | 883,6   |
| 857,225         | 857,4   | 857,975 | 858,175 | 859,925 | 870,075 |         | 873,7   | 882,075 |         | 884,95  | 890,4   |
| 821,6           | 821,7   | 822,1   | 822,6   | 824,5   | 836,3   |         | 839,4   | 848,5   |         | 851,2   | 854,3   |
| 859,9           | 860,1   | 860,1   | 860,4   | 862     | 868,6   |         | 872     | 878,4   |         | 882,1   | 888,3   |
| 828             | 828     | 828,4   | 828,5   | 824,3   | 837,3   |         | 841     | 847,2   |         | 851,6   | 859,3   |
| 847,3           | 847,5   | 848,2   | 848,4   | 850     | 862,5   |         | 870     | 879,6   |         | 882,4   | 886,9   |
| 839,2           | 839,325 | 839,7   | 839,975 | 840,2   | 851,175 |         | 855,6   | 863,425 |         | 866,825 | 872,2   |
| 847,9           | 848     | 848,5   | 848,7   | 850,2   | 857,8   |         | 861,6   | 868,8   |         | 872,7   | 880,1   |
| 834,2           | 834     | 834,4   | 835     | 836,3   | 842,6   |         | 846,4   | 852,5   |         | 856,2   | 862,2   |
| 846,8           | 847,5   | 847,6   | 848,3   | 849,2   | 855     |         | 860,8   | 866,1   |         | 872,9   | 878,2   |
| 812,2           | 812,6   | 813,2   | 813,7   | 815,8   | 827,1   |         | 833,6   | 841,3   |         | 845,2   | 851,2   |
| 835,275         | 835,525 | 835,925 | 836,425 | 837,875 | 845,625 |         | 850,6   | 857,175 |         | 861,75  | 867,925 |

Fuente: Elaboración propia